

**STUDI TENTANG KOMUNIKASI RADIO
RUANG TERTUTUP UNTUK PABRIK-PABRIK
DI MASA DEPAN**

TUGAS AKHIR

Oleh :

D J U W A R I

2292.100.134

RSE
621 384 11
Dja
S-1
1997



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
1997**



MILIK PERPUSTAKAAN
INSTITUT TEKNOLOGI
SEPULUH - NOPEMBER

**STUDI TENTANG KOMUNIKASI RADIO
RUANG TERTUTUP UNTUK PABRIK-PABRIK
DI MASA DEPAN**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik Elektro
Pada**

**Bidang Studi Teknik Telekomunikasi
Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
S u r a b a y a**

**Mengetahui / Menyetujui
Dosen Pembimbing**



(Ir. FAISAL GUNAWAN)

**S U R A B A Y A
Pebruari, 1997**

ABSTRAK

Adanya tuntutan otomatisasi pabrik membutuhkan komunikasi yang andal antara komputer pengontrol dengan peralatan pabrik yang dikontrol. Komunikasi yang ada saat ini adalah dengan menggunakan kabel yang memiliki kekurangan antara lain kerumitan pemasangan / instalasi, kesulitan pengembangan jaringan, perlunya pengaturan letak kabel untuk menjaga keindahan, kesulitan perawatan, terbatasnya bandwidth operasi dan lain-lain. Hal ini memberikan tantangan penggunaan gelombang radio sebagai media komunikasi.

Untuk implementasi kanal radio ruang tertutup untuk pabrik khususnya diperlukan pengetahuan yang cukup mengenai propagasi gelombang radio dalam pabrik. Ini disebabkan lingkungan radio pabrik yang berbeda dengan lingkungan propagasi radio ruang bebas pada umumnya yang dipengaruhi antara lain oleh bahan konstruksi bangunan, umur pabrik, peralatan-peralatan dalam pabrik dan bentuk pabrik yang umumnya berupa daerah terbuka yang sangat luas tanpa penyekatan.

Pengukuran-pengukuran propagasi radio dalam pabrik dilakukan dengan tujuan mengetahui karakteristik propagasi radio dalam pabrik yang antara lain meliputi fading, redaman, pengaruh pembayangan, noise dan interferensi untuk pemakai jamak. Kanal pabrik dibagi ke dalam empat topografi yaitu LOS light clutter, LOS heavy clutter, OBS light clutter dan OBS heavy clutter. Dari pengukuran didapatkan bahwa path loss tergantung pada lingkungan sekitar dan mempunyai distribusi log-normal, fading sesaat berdistribusi rician, dan fading skala kecil yang disebabkan gerakan penerima terdistribusi Rayleigh. Kemudian dibuat juga model statistik kanal radio dalam pabrik beserta parameter-parameter pentingnya. Performance dari kanal radio dalam pabrik diukur dengan S/N (BER untuk digital) dan rms delay spread, yang dari pengukuran didapatkan berharga antara 30 sampai 300 ns.

Kemudian diberikan beberapa teknik optimasi kanal radio pabrik antara lain teknik antena terdistribusi yang mampu menekan harga rms delay spread, optimum combining yang mampu menaikkan kapasitas kanal atau menekan jumlah penginterferensi, dan beberapa pertimbangan pemakaian teknik multiple access yang pemakaiannya tergantung pada jumlah pemakai, selang waktu transmisi, batas kecanggihan masing-masing terminal, dan perlunya pengontrolan sepenuh waktu.

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan syukur kepada Allah Bapa dalam nama Tuhan Yesus Kristus yang telah memberikan kemampuan, kekuatan, bimbingan, penyertaan dan kasih karunia sehingga penyusun dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini yang berjudul :

STUDI TENTANG KOMUNIKASI RADIO RUANG TERTUTUP UNTUK PABRIK-PABRIK DI MASA DEPAN

Tugas Akhir ini mempunyai bobot kredit 6 SKS dan merupakan salah satu persyaratan akademis yang harus ditempuh setiap mahasiswa Jurusan Teknik Elektro - Fakultas Teknologi Industri - Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik Elektro.

Akhirnya penyusun berharap, semoga buku tugas akhir ini berguna bagi semua pihak yang memerlukan, sesuai dengan tujuan penyusunannya.

Surabaya, 17 Pebruari 1997

PENYUSUN

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan selesainya penulisan Tugas Akhir ini, penulis menyampaikan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Ir. Teguh Yuwono selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS
2. Bapak Ir. M. Aries Poernomo selaku Koordinator Bidang Studi Teknik Telekomunikasi.
3. Bapak Ir. Faisal Gunawan, sebagai dosen pembimbing yang telah memberikan saran dan petunjuk selama penyusunan Tugas Akhir ini.
4. Bapak, ibu, kakak, adik dan seluruh keluarga di rumah yang telah memberikan bantuan dan motivasi yang sangat besar dan dukungan doa dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Bapak DR. Ir. Susilo Matair, M. EngSc. yang telah sangat membantu penulis mengawali kuliah di Jurusan Teknik Elektro FTI - ITS.
6. Semua saudara-saudara seiman yang telah memberikan dukungan doa dan saran serta nasihatnya.
7. Semua pihak yang telah banyak membantu penyelesaian Tugas Akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu.

DAFTAR ISI

BAB	HALAMAN
JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
ABSTRAK	iii
KATA PENGANTAR	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xiv
 I. PENDAHULUAN	 1
I.1. Latar Belakang	1
I.2. Permasalahan dan Pembatasan Masalah	2
I.3. Tujuan	3
I.4. Metodologi	3
I.5. Penelaahan Studi	4
I.6. Sistematika	4
I.7. Relevansi	6

II. TEORI PENUNJANG	7
II.1. Lingkungan Radio Ruang Tertutup	7
II.2. Metode Statistik Karakteristik Gelombang Radio	12
II.2.1. Rata-rata dan Simpangan baku	12
II.2.2. Fungsi Kerapatan Probabilitas	14
II.2.3. Distribusi Probabilitas Kumulatif	14
II.2.4. Fungsi Kerapatan Probabilitas Standar	15
II.3. Teknik Multiple Access	23
II.4. Teknik Spread Spectrum	26
II.4.1. Direct Sequence Spread Spectrum	28
II.4.2. Frequency Hoping Spread Spectrum	29
II.4.3. Time Hoping Spread Spectrum	30
II.5. Konsep CDMA	31
II.5.1. Sistem Direct Sequence CDMA	33
II.5.2. Sistem Frequency Hoping CDMA	37
III. SISTEM KOMUNIKASI RADIO PABRIK	40
III.1. Pengukuran	41
III.1.1. Gambaran dari pabrik-pabrik yang diukur	43
III.1.2. Perencanaan Percobaan	46
III.2. Data Hasil Pengukuran	51
III.2.1. Hasil-hasil Pengukuran Path Loss	55
III.2.2. Shadowing	64

III.2.3. Fading Skala Kecil	67
III.2.4. Fading Sesaat	72
III.2.5. RMS Delay Spread (σ) dan Mean Excess Delay ($\bar{\tau}$) ...	75
III.3. Model Kanal Dan Parameter Penting	88
III.3.1. Model Kanal	88
III.3.2. Parameter Kanal Multipath	91
III.4. Noise Dan Interferensi	92
III.4.1. Noise Pabrik	92
III.4.2. Interferensi	94
IV. TEKNIK OPTIMASI KANAL RADIO PABRIK	95
IV.1. Sistem Antena Terdistribusi	96
IV.1.1. Penggunaan Sel Kecil	99
IV.1.2. Pemakaian Antena Terdistribusi	101
IV.1.2.1. Sistem Distribusi	101
IV.1.2.2. Antena Monopole Omnidirectional	103
IV.1.2.3. Antena Double-Horn	104
IV.2. Optimum Combiner	105
IV.2.1. Optimum Combining	105
IV.2.2. Gambaran Dan Persamaan Pembobotan	107
IV.2.3. Asumsi Awal Dan Analisa	109
IV.2.4. SINR Dan BER	110
IV.2.5. Banyak Pemakai Per Kanal	112

IV.2.6. Interferensi	121
IV.3. Teknik Multiple Access	125
V. KESIMPULAN	129
DAFTAR PUSTAKA	131
USULAN TUGAS AKHIR	132
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	136

DAFTAR GAMBAR

GAMBAR	HALAMAN
2-1 Variasi Kuat Sinyal Dari Sinyal Fading Rayleigh Sebagai Fungsi Dari Selisih Jarak	7
2-2 Sistem Radio Dengan Sebuah Base Station Dengan M Antena Dan N Remote Masing-Masing Dengan Satu Antena	9
2-3 Kurva Distribusi Uniform	16
2-4 Kurva Distribusi Normal	17
2-5 Kurva Distribusi Rayleigh	20
2-6 Kurva Distribusi Rician	21
2-7 Arsitektur CDMA	25
2-8 Diagram Blok Sistem Pemancar Direct Sequence	34
2-9 Diagram Blok Sistem Penerima Direct Sequence	36
2-10 Diagram Blok Sistem Pemancar Frequency Hoping	38
2-11 Diagram Blok Sistem Penerima Frequency Hoping	39
3-1 Diagram Blok Peralatan Pengukuran Lintasan Jamak Pabrik	42
3-2 Fluktuasi Acak Umum Respon Impulse Daya Dengan Penerima Digerakkan Sepanjang Lintasan 1 m Dalam Topografi Lintasan LOS Pada Site B	52

3-3	Fluktuasi Acak Umum Respon Impulse Daya Dengan Penerima Digerakkan Sepanjang Lintasan 1 m Dalam Topografi Lintasan OBS Pada Site F	52
3-4	Respon Impulse Daya Rata-rata Acak Dari Berbagai Topografi ...	54
3-5	Path Loss Skala Besar Pada Semua Site	57
3-6	Distribusi Kumulatif Fari Level Sinyal Skala Besar Di Sekitar Nilai Rata-rata	59
3-7	Pengukuran Path Loss Pada Lintasan Ruang Bebas Untuk 10 Lokasi Identik Dalam Lima Pabrik	61
3-8	Fading Yang Umum Untuk Penerima Yang Bergerak Dalam Pabrik	68
3-9	Distribusi Kumulatif Untuk Tiga Pengukuran Dan Kecocokannya Dengan Distribusi Yang Ada	70
3-10	Distribusi Kumulatif Dari Fading Skala Kecil Untuk Semua Pabrik Dan Topografi	71
3-11	Pengukuran Fading Sesaat (Site F), Jarak Tx-Rx 25 m	72
3-12	Distribusi Level Sinyal Kumulatif Untuk Fading Sesaat	73
3-13	Scatter Plot Dari Excess Mean Delay Terhadap RMS Delay Spread Sebagai Fungsi Distribusi Pabrik	78
3-14	Distribusi Kumulatif Dari σ Untuk Semua Lintasan LOS	79
3-15	Distribusi Kumulatif Dari σ Untuk Semua Lintasan OBS	80
3-16	RMS Delay Spread σ (ns)	80

3-17 Distribusi Kumulatif Dari σ Untuk Topografi Lintasan LOS Dan OBS Dalam Berbagai Macam Bangunan	81
3-18 Scatter Plot Dari σ Terhadap Jarak Pemancar-Penerima Sebagai Fungsi Topografi Pabrik	87
3-19 Scatter Plot Dari σ Terhadap Path Loss Pada Transmisi Ruang Bebas 10λ Sebagai Fungsi Topografi Pabrik	88
3-20 Pengukuran Spektrum Daya Noise Puncak	93
4-1 Floor Plan Dari Bangunan Beserta Lokasi Dari Berbagai Macam Antena	99
4-2 Statistik Delay Spread Dari Berbagai Macam Sistem Antena ...	100
4-3 Statistik Redaman Dari Berbagai Macam Sistem Antena	100
4-4 Pengaturan Sistem Antena Terdistribusi	103
4-5 Diagram Blok Combiner Dengan M Elemen Antena Diversiti ...	108
4-6 Grafik I/S Terhadap S/N Untuk BER 10^{-3}	110
4-7 Probabilitas Bahwa K Pemakai Dapat Menggunakan Kanal Yang Sama Secara Serentak Dengan BER Lebih Kecil Dari 10^{-3} Terhadap SNR Yang Diinginkan Diterima Per Antena Untuk Antena Penerima Sebanyak $M=2$ Dan $M=4$	115
4-8 Probabilitas Bahwa K Pemakai Dapat Menggunakan Kanal Yang Sama Secara Serentak Dengan BER Lebih Kecil Dari 10^{-3} Terhadap SNR Yang Diinginkan Diterima Per Antena Untuk Antena Penerima Sebanyak $M=2$ Dan $M=4$	116

4-9	Probabilitas Bahwa Pemakai Ke- K Dapat Ditambahkan Pada Kanal Yang Telah Mempunyai $K - 1$ Pemakai Dengan BER Lebih Kecil Dari 10^{-3} Untuk Semua K Pemakai Terhadap SNR Yang Diinginkan Per Antena Untuk $M = 6$ Antena Penerima	116
4-10	Kapasitas (Jumlah Maksimum Pemakai Serentak) Terhadap Γ_d (dB) Untuk Sistem Kanal Tunggal Dengan Probabilitas Blocking 0,01 Untuk Beberapa Harga M	118
4-11	Kapasitas (Jumlah Maksimum Pemakai Serentak) Terhadap Γ_d (dB) Untuk Sistem Enam Kanal Dengan Probabilitas Blocking 0,01 Untuk Beberapa Harga M	120
4-12	Maksimum Γ_J / Γ_D Untuk Probabilitas Blocking 0,01 Dengan Delapan Kanal Dan Enam Antena	122
4-13	Jumlah Maksimum Penginterferensi Pada Sebarang Daya Terhadap Γ_D Untuk Probabilitas Blocking 0,01 Dengan Satu Kanal Dan $M = 6, 4$, Dan 2 Antena	124
4-14	Jumlah Maksimum Penginterferensi Pada Sebarang Daya Terhadap Γ_D Untuk Probabilitas Blocking 0,01 Dengan Delapan Kanal Dan $M = 6, 4$, Dan 2 Antena	124

DAFTAR TABEL

TABEL		HALAMAN
3-1	Eksponen Path Loss sebagai Fungsi Jenis Pabrik	56
3-2	Eksponen Path Loss sebagai Fungsi Topografi Pabrik	56
3-3	Pengaruh Bayangan dari Peralatan Pabrik yang Umum	66
3-4	Rms Delay Spread Data (lintasan 10-25 m)	75
3-5	Rms Delay Spread Data (lintasan 40-75 m)	76

BAB I

PENDAHULUAN

I. 1. LATAR BELAKANG

Pada masa yang akan datang, hampir semua pabrik besar cenderung menggunakan otomatisasi dalam operasinya. Dalam sistem ini ada bagian yang dikontrol (peralatan / mesin-mesin produksi pabrik) dan ada bagian pengontrolnya (komputer). Hubungan komunikasi antara komputer pengontrol dengan peralatan yang dikontrol saat ini dilakukan dengan menggunakan kabel. Sistem ini mempunyai kelemahan antara lain kerumitan pemasangan / instalasi, kesulitan pengembangan jaringan, perlunya pengaturan letak kabel untuk menjaga keindahan, kesulitan perawatan, terbatasnya bandwidth operasi dan lain-lain.

Untuk mengatasi hal tersebut diperlukan sistem komunikasi tanpa kabel (wireless) dengan menggunakan gelombang radio. Sistem ini mempunyai beberapa kelebihan yang mampu mengatasi kekurangan dari sistem sebelumnya. Sistem ini juga mendukung jaringan pelayanan terpadu digital tanpa kabel (Wireless Integrated Service Digital Network) yang memungkinkan penggabungan antara sistem telepon selular, wireless LAN dan jaringan komunikasi dalam otomatisasi pabrik di masa yang akan datang seperti jaringan ISDN yang sudah ada saat ini yang menggunakan kanal telepon.

Tetapi karakteristik propagasi gelombang radio dalam ruang tertutup belum diketahui dengan pasti dan sedang dalam bidang penelitian aktif dari

perusahaan telekomunikasi dunia. Ini disebabkan karena propagasi gelombang radio dalam ruang tertutup sulit untuk ditebak dan terus menerus berubah. Data-data mengenai propagasi radio ruang tertutup masih sedikit sekali. Juga kondisi lingkungan pabrik yang sangat berbeda dari lingkungan komunikasi radio bergerak yang umum menyebabkan perencanaan sistem komunikasi yang berbeda dengan ukuran performance yang berbeda pula.

Oleh sebab itu dibutuhkan suatu studi mengenai karakteristik gelombang radio ruang tertutup khususnya dalam pabrik dan menentukan parameter-parameter performance yang berguna dalam penggunaan teknik-teknik optimasi yang akan memaksimalkan penggunaan bandwidth kanal yang diberikan.

I. 2. PERMASALAHAN DAN PEMBATAAN MASALAH

Untuk dapat merancang suatu sistem komunikasi radio dalam ruang tertutup, khususnya dalam pabrik, diperlukan suatu studi pendahuluan yang cukup memadai mengenai karakteristik propagasi gelombang radio dalam lingkungan pabrik pada kondisi operasi normal. Tetapi saat ini, belum ada suatu literatur terbuka yang secara rinci menjelaskan karakteristik propagasi radio dalam lingkungan pabrik. Pekerjaan yang dilakukan di sini dibatasi pada pemberian data empiris yang dikumpulkan dari lima pabrik dan secara statistik mengolah data untuk membentuk model kanal radio pabrik. Model tersebut akan digunakan untuk perhitungan lintasan (link budget) untuk menentukan dan mengidentifikasi faktor-faktor kunci yang membatasi performance dari sebuah sistem radio pabrik UHF.

Data-data yang dikumpulkan adalah hasil pengukuran pada lima pabrik dengan menggunakan frekuensi 800, 900, 1200, dan 1500 MHz. Ini disebabkan karena studi yang lebih dahulu ada dilakukan pada frekuensi tersebut dan Federal Communications Commission (FCC) telah mengalokasikan spektrum untuk komunikasi radio industri narrow-band pada pita frekuensi VHF (450 MHz) dan UHF (900 MHz). Baru-baru ini, FCC mengesahkan pemakaian sistem spread spectrum yang cocok untuk perencanaan pada frekuensi 900 MHz, 2,400 MHz, dan 5,725 MHz. Sistem komunikasi yang ditinjau di sini adalah sistem komunikasi digital dengan sebuah stasiun utama (base station) dan banyak stasiun jauh (remote station).

I. 3. TUJUAN

Mempelajari karakteristik propagasi gelombang radio dalam ruang tertutup untuk pabrik pada suatu frekuensi tertentu, membentuk model kanal radio pabrik, dan menemukan teknik-teknik optimasi yang dapat digunakan untuk memaksimalkan bandwidth kanal yang diberikan.

I. 4. METODOLOGI

Metode pembahasan yang digunakan dalam mempelajari sistem komunikasi radio ruang tertutup untuk pabrik ini adalah sebagai berikut :

- 1). Studi literatur
- 2). Pembahasan dari literatur
- 3). Analisa

4). Kesimpulan

I. 5. PENELAAHAN STUDI

Dalam sistem komunikasi ruang tertutup, yang lingkungan sekelilingnya adalah dinding bangunan, lantai, konstruksi bangunan dan struktur atap tertentu menciptakan sebuah lingkungan yang bermusuhan untuk komunikasi radio, dimana di dalam sebuah bangunan propagasi dari gelombang radio sulit ditebak dan berubah secara kontinyu. Karakterisasi yang akurat dari kanal kerja adalah persyaratan utama untuk pembangunan sistem radio ruang tertutup yang andal.

Masalah-masalah yang meliputi multipath dan shadow fading yang memperkecil daerah cakupan, dispersi karena pelebaran delay, yang membatasi kecepatan data maksimum. Lebih jauh lagi di dalam bangunan dengan pemakai jamak, interferensi antara pemakai dapat menjadi suatu masalah yang serius, dan spektrum yang digunakan mungkin lebih kecil daripada yang dibutuhkan untuk menangani seluruh pemakai yang potensial.

I. 6. SISTEMATIKA

Sistematika pembahasan studi literatur ini akan diuraikan dalam beberapa bab, yaitu :

- Pendahuluan

Dalam bab ini diuraikan mengenai latar belakang hingga timbulnya permasalahan yang ada dilapangan, dimana dari permasalahan yang ada diambil pokok permasalahannya dan dijadikan ide dasar bagi

studi literatur ini. Selain itu diuraikan juga tujuan serta ruang lingkup dari studi dan untuk memperjelas pemahaman dari tugas akhir ini disertakan pula sistematika penulisan dari tugas akhir.

- * Teori Penunjang

Bab ini menguraikan dasar teori yang berhubungan dengan studi ini dan yang digunakan dalam analisa dan pembahasan antara lain mengenai karakterisasi propagasi gelombang radio ruang tertutup, teknik multiple access, diversiti antena dan gambaran mengenai lingkungan radio ruang tertutup.

- * Sistem Komunikasi Radio Pabrik

Di sini diuraikan mengenai rancangan percobaan, teknik pengukuran, pembentukan model kanal radio pabrik, propagasi lintasan jamak, fading, path loss, noise, dan interferensi pada pemakai jamak.

- * Teknik Optimasi Kanal Radio Pabrik

Bab ini memberikan analisa model kanal radio pabrik dan membahas macam-macam teknik optimasi dengan berpedoman pada parameter performance yang digunakan pada sistem digital (BER) seperti teknik modulasi, teknik multiple access, pemakaian diversiti, dan optimum combining.

- * Kesimpulan

Memberikan kesimpulan dari hasil pengukuran, pemodelan dan kesimpulan serta saran-saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil studi ini.

1. 7. RELEVANSI

Dengan dipahaminya tentang karakteristik propagasi dari gelombang radio dalam ruang tertutup, metode pengukuran yang digunakan, dan teknik optimasi yang dapat memaksimalkan penggunaan kanal maka diharapkan dapat dibuat suatu perencanaan tentang aplikasi dari bidang ini untuk suatu pabrik tertentu.

BAB II

TEORI PENUNJANG

Ada beberapa dasar pengetahuan yang diperlukan untuk mempelajari karakteristik propagasi gelombang radio dalam ruang tertutup, khususnya dalam pabrik. Pertama adalah mengenai lingkungan komunikasi radio ruang tertutup dalam pabrik. Kedua adalah dasar-dasar statistik untuk karakterisasi kanal komunikasi radio dalam pabrik yang meskipun di sini tidak digunakan untuk mengolah data secara langsung tetapi penting untuk memahami beberapa istilah yang akan digunakan untuk karakterisasi secara statistik.

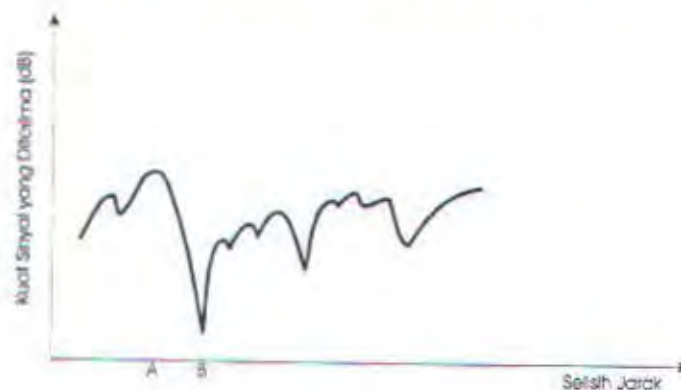
Kemudian dalam studi tentang teknik optimasi yang akan digunakan untuk memaksimalkan nilai SNR (BER untuk komunikasi digital) diberikan pula dasar teknik diversiti, teknik multiple access, teknik spread spectrum dan beberapa dasar teori yang lain yang diperlukan.

II.1 Lingkungan Radio Ruang Tertutup

Dalam komunikasi radio ruang tertutup, jarang ada lintasan langsung (*line of sight* / LOS) antara pemancar dan penerima, dan yang ada adalah lintasan jamak (*multipath*). Sinyal-sinyal dari berbagai lintasan akan terkombinasi, baik saling menguatkan maupun melemahkan pada penerima yang akan menghasilkan *multipath fading*. Untuk transmisi narrow-band, dimana delay propagasi yang

berhubungan dengan macam-macam lintasan adalah sangat kecil dibandingkan dengan kebalikan dari bandwidth sinyal, kanal ini dapat dianggap mempunyai Rayleigh fading dengan *frequency flat fading*. Rayleigh fading ini dihasilkan oleh propagasi lintasan jamak yang mengakibatkan adanya variasi kuat sinyal ketika penerima ditempatkan secara terpisah seperti pada gambar 2-1. Sebuah penerima pada lokasi A menerima kuat sinyal maksimum, sedangkan penerima pada lokasi B dalam fading dan menerima kuat sinyal minimum. Fading ini biasanya terjadi setiap setengah panjang gelombang. Sebagai contoh, pada 900 MHz, panjang gelombang mendekati satu kaki (0.3 m) dan banyak fading dapat terjadi pada jarak pendek.

Sebagai tambahan pada multipath fading, ada juga *shadow fading*, disebabkan oleh blokade dan redaman sinyal oleh dinding-dinding, pintu dan sebagainya. Shadow fading secara spektrum datar / rata dan dikarakterisasi oleh distribusi log normal, yaitu, logaritmik dari daya sinyal yang diterima mempunyai

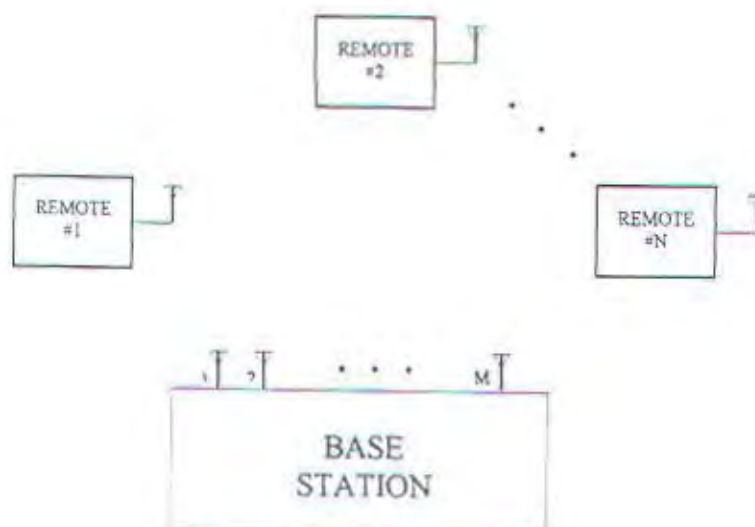


Gambar 2-1¹⁾
 VARIASI KUAT SINYAL DARI SINYAL FADING RAYLEIGH
 SEBAGAI FUNGSI DARI SELISIH JARAK

¹⁾ A. S. Acampora & J. H. Winters, System Applications for Wireless Indoor Communication, IEEE Communication Magazine Vol. 25, No. 8, Aug 1987, hlm.12

distribusi Gaussian. Shadow fading berubah secara lambat dengan lokasi, dengan terjadinya fading dalam bagian yang berbeda dari bangunan. Sejumlah studi telah dibuat untuk Shadow dan Rayleigh fading dalam bangunan-bangunan.

Dalam transmisi wideband, delay lintasan mempengaruhi kualitas dari sinyal yang diterima. Lebar delay ini menyebabkan *frequency selective fading* dalam kanal. Jadi, kuat sinyal yang diterima juga bervariasi sebagai fungsi frekuensi, mirip dengan variasi kuat sinyal terhadap lokasi. Meskipun model-model yang berbeda-beda untuk lebar delay ada, performance dari sistem komunikasi terutama tergantung pada lebar delay rms. Dalam sistem digital, dispersi dalam kanal yang disebabkan oleh lebar delay menghasilkan interferensi intersymbol yang naik sesuai laju sinyal, yang membatasi laju data maksimum



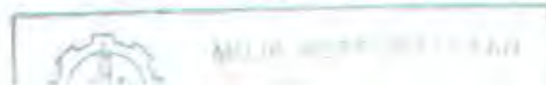
Gambar 2-2²⁾
SISTEM RADIO DENGAN SEBUAH BASE STATION DENGAN M ANTENA
DAN N REMOTE MASING-MASING DENGAN SATU ANTENA

²⁾ ibid hal.12

untuk BER yang dapat diterima. Sejumlah studi telah dibuat untuk lebar delay dalam bangunan-bangunan.

Dalam tugas akhir ini, dipelajari sistem komunikasi radio ruang tertutup yang terdiri atas sebuah stasiun utama dengan sejumlah remote (stasiun jauh) seperti pada gambar 2-2. Dalam gambar ini, stasiun utama mempunyai banyak antena dan stasiun jauh (remote) hanya mempunyai satu antena, untuk alasan yang akan jelas kemudian. Tipe sistem ini memberikan keuntungan pengontrol pusat yang dapat memastikan bahwa semua pemakai menerima performance yang cukup memadai walaupun lingkungan radio di dalam bangunan sulit untuk diperkirakan dan terus berubah. Perlu dicatat bahwa semua pemakai dapat menggunakan baik kanal tunggal maupun sekelompok kanal yang telah ditetapkan bagi pemakai. Konfigurasi sistem seperti ini mirip dengan yang digunakan pada radio bergerak.

Tetapi radio ruang tertutup berbeda dari radio bergerak dalam dua aspek penting : lingkungan interferensi dan laju fading. Pertama, lingkungan interferensi adalah buruk dalam radio ruang tertutup karena redaman sinyal melewati sebuah bangunan dapat bervariasi dengan sangat luas dan tidak dapat diperkirakan. Sinyal bisa sangat teredam setelah merambat lebih dari ribuan kaki sepanjang gang. Oleh karena itu tanpa studi yang cukup mahal dan teliti pada masing-masing bangunan, interferensi antar pemakai dalam bangunan yang sama atau yang berdekatan (dan dari sistem yang sama atau berbeda) tidak dapat diramalkan dan sering kuat sekali (seperti kebanyakan pemakai telepon tanpa kabel yang sudah ada). Radio ruang tertutup juga berbeda dari radio bergerak dalam laju fading. Dalam radio



bergerak, penerima mengalami banyak fading per detik. Sebagai contoh, pada kecepatan 60 mil/jam, laju fadingnya kira-kira 80 Hz pada frekuensi pembawa 800 MHz. Sebagai hasilnya, studi dalam radio bergerak dikonsentrasikan pada performance kanal rata-rata pada fading.

Komunikasi ruang tertutup sungguh berbeda dalam hal bahwa baik dalam stasiun utama dan stasiun jauh adalah stasioner atau bergerak lambat. Oleh karena itu performance rata-rata atas fading tidak menarik, misalnya : Jika diberikan sejumlah besar stasiun yang ditempatkan secara acak, berapa peluang sejumlah stasiun yang pasti gagal untuk memenuhi BER yang diharapkan. "Dengan peluang 10^{-4} link komunikasi tidak dapat memenuhi BER 10^{-4} yang dibutuhkan." Kriteria di atas, didasarkan pada probabilitas keluaran, yang mencirikan dua aplikasi komunikasi dalam bangunan berikut ini.

- 1) *Telepon portable*. Pemakai mungkin memegang telepon dan bergerak lambat selama sebuah konservasi. Dalam hal ini, pemakai akan mengalami banyak fading, sekalipun secara perlahan. Kami ingin melukiskan situasi ini dengan menyatakan bahwa pemakai akan mengalami BER lebih besar dari 10^{-4} untuk tidak lebih dari 0.01 persen dari konservasi.
- 2) *Terminal stasioner*. Di atas telah diijinkan untuk menyatakan bahwa tidak lebih dari 0.01 persen terminal-terminal yang ditempatkan secara acak akan mengalami BER lebih dari 10^{-4} . Tetapi, karena gerakan di dalam sebuah bangunan (misalnya, orang berjalan, pintu terbuka, dan sebagainya), BER untuk terminal tertentu mungkin berubah secara lambat terhadap waktu.

Sebuah keluaran dapat disebabkan oleh noise termal (level sinyal yang diterima terlalu rendah), interferensi dari pemakai yang lain, dan / atau interferensi intersymbol disebabkan oleh lebar delay. Jadi untuk sebuah sistem dengan probabilitas keluaran tertentu, interferensi membatasi jumlah pemakai dalam suatu daerah tertentu, dan, dalam sistem wideband, lebar delay membatasi laju data. Perlu diperhatikan apakah batas-batas ini dalam sistem narrow-band dan wideband dan menunjukkan bagaimana diversiti dalam kombinasi dengan teknik-teknik yang lain dapat digunakan untuk menaikkan batas-batas tersebut secara besar.

II.2 METODA STATISTIK KARAKTERISTIK KANAL RADIO

Metoda statistik yang sering digunakan dalam pembahasan kanal radio mobil adalah : nilai rata-rata, fungsi kerapatan probabilitas, distribusi probabilitas kumulatif, dan fungsi auto korelasi.

II.2.1 Rata - rata (Mean) dan Simpangan Baku (Standard Deviasi)

Nilai rata-rata

Ada empat macam definisi tentang nilai rata-rata yang sering digunakan dalam komunikasi bergerak yaitu :

II.2.1.1 Rata - rata Sampel (\bar{x})

Rata - rata sampel adalah nilai rata-rata yang merupakan hasil bagi antara jumlah seluruh besaran dengan jumlah percobaan. Secara matematis nilai rata-rata ini dituliskan sebagai berikut : ¹⁾

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (2-1)$$

dimana : x_i = variabel acak

N = jumlah percobaan / sampel

II.2.1.2 Rata - rata Statistik

Rata-rata statistik adalah nilai rata-rata dari besaran untuk sejumlah percobaan / sample yang jumlahnya banyak. Secara matematis dituliskan sebagai berikut :

$$\bar{x} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N} \quad (2-2)$$

Dengan menggabungkan persamaan (2-1) dengan (2-2) kita dapatkan toleransi kesalahan sebagai berikut :

$$(E(x) - \bar{x})^2 < \delta \quad (2-3)$$

dimana : δ adalah toleransi kesalahan

II.2.1.3 Biased Time Average $\bar{x}(t)$

Biased Time Average adalah nilai rata-rata untuk variabel kontinyu $x(t)$ dalam kawasan waktu T yang terhingga dapat dituliskan :

$$\bar{x}(t) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (2-4)$$

dimana $x(t)$ adalah besaran statistik sebagai fungsi waktu.

II.2.1.4 Unbiased Time Average $\langle x(t) \rangle$

Unbiased Time Average adalah nilai rata-rata untuk variabel kontinyu $x(t)$ dalam kawasan waktu yang sangat panjang, dituliskan sebagai :

$$\langle x(t) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (2-5)$$

Analisa dengan sinyal radio mobil sebagai variabel acak, nilai rata-rata statistik pada persamaan (2-2) identik dengan nilai unbiased time average pada persamaan (2-5). Proses yang memenuhi ekivalensi di atas dinamakan proses ergodic, yang secara matematis dapat dituliskan sebagai :

$$E [x(t)] = \langle x(t) \rangle$$

$$E [x^2(t)] = \langle x^2(t) \rangle$$

$$E [x^n(t)] = \langle x^n(t) \rangle$$

II.2.2 Fungsi Kerapatan Probabilitas

Fungsi kerapatan probabilitas (probability density function/pdf) didefinisikan sebagai turunan terhadap x dari fungsi kumulatif atau cpd. Notasi dari fungsi kerapatan probabilitas (pdf) adalah sebagai berikut :

$$p(y) = \left[\frac{20 \log_{10} e}{y} \right] p(x) \quad (2-6)$$

dimana : $p(y)$: pdf dari y dalam skala linier

$p(x)$: pdf dari x dalam skala desibel

II.2.3 Distribusi Probabilitas Kumulatif

Untuk variabel acak x yang mempunyai nilai spesifik X , distribusi probabilitas kumulatif (cpd-cummulative probability distribution) didefinisikan sebagai probabilitas dari variabel acak tersebut untuk dapat bernilai sama atau lebih daripada X . Bentuk matematis cpd adalah sebagai berikut :

$$F(x) = \text{prob}(x \leq X) = P(x \leq X) \quad (2-7)$$

$F(x)$ disebut sebagai fungsi distribusi probabilitas dari x .

Distribusi probabilitas kumulatif ini sering digunakan pada alur distribusi yang kontinyu. Pada pengukuran kuat medan sinyal penerimaan dalam sistem komunikasi bergerak, data kuat medan disusun terdistribusi untuk berbagai interval nilai secara kumulatif. Kemudian bentuk kurva yang diperoleh didekati dengan fungsi distribusi yang mendekati kurva tersebut, sehingga analisa selanjutnya terhadap kuat medan pada stasiun penerima bergerak tersebut dilakukan dengan menggunakan sifat-sifat distribusi tersebut.

II.2.4 Fungsi Kerapatan Probabilitas Standar

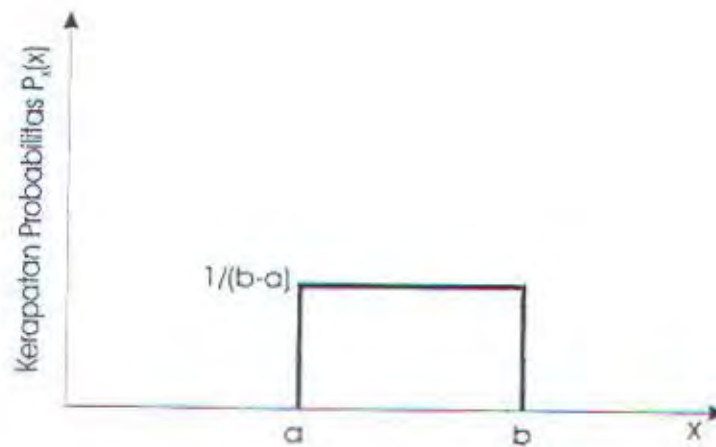
II.2.4.1 Distribusi Uniform

Suatu besaran x dikatakan memiliki distribusi uniform pada interval (a,b) adalah jika besaran tersebut akan muncul pada interval tersebut dengan probabilitas yang sama. Bentuk kurva distribusi uniform dapat dilihat pada gambar 2-3.

Fungsi kerapatan probabilitasnya (pdf) dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$P_x(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a \leq x \leq b \\ 0 & \text{lainnya} \end{cases} \quad (2-8)$$

Maksud dari gambar di bawah adalah menjelaskan bahwa fungsi kerapatan probabilitasnya adalah bernilai tetap pada interval (a,b) yang berarti kemungkinan nilai besaran itu akan sama dan berada pada interval tersebut.



Gambar 2-3³⁾
KURVA DISTRIBUSI UNIFORM

II.2.4.2 Distribusi Normal (Gaussian)

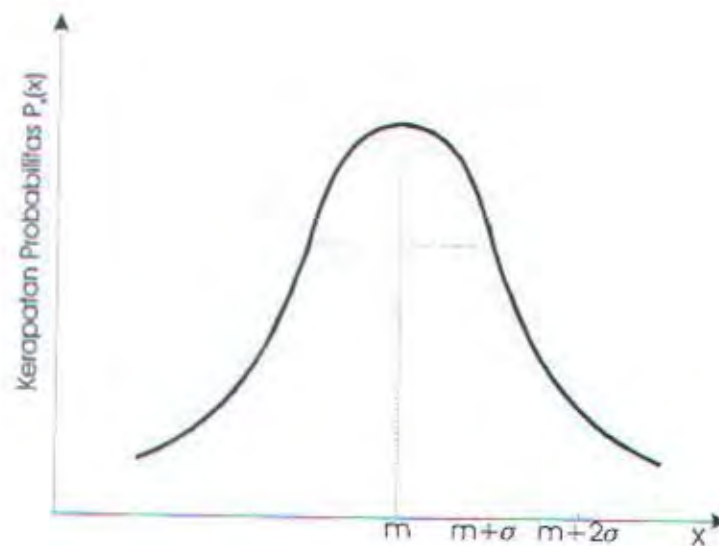
Fungsi kerapatan probabilitas (pdf) untuk variabel acak yang terdistribusi Gaussian (normal) adalah sebagai berikut :

$$P_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2-9)$$

Dari bentuk kurva jelas terlihat bahwa kemungkinan nilai besaran berada pada suatu interval semakin besar apabila interval berada disekitar nilai tengah dari yang bersangkutan.

Dalam distribusi normal nilai rata-rata (mean), nilai yang paling sering muncul (modus), dan nilai tengah (median) berada pada satu titik yaitu pada garis simetris dari kurva distribusi normal.

³⁾ K. S. Shamugan, " Digital and Analog Communication System", John Wiley & Sons. 1979, hal. 80



Gambar 2-4⁴⁾
Kurva Distribusi Normal

Mean didefinisikan sebagai :

$$m = \int_x P_x(x) dx = E[x] \quad (2-10)$$

Batas integrasi dari $-\infty$ sampai ∞ , hal ini untuk menghitung nilai rata-rata dari keseluruhan sampel yang ada (muncul).

Standard deviasi didefinisikan sebagai :

$$\sigma = \sqrt{E[x^2] - m^2} \quad (2-11)$$

dimana : $E[x^2] = \int x^2 P_x(x) dx$, yaitu mean kuadrat.

Standard deviasi σ menyatakan penyebaran disekitar mean m (sampai terjadi perubahan kurva). Semakin besar nilai σ semakin lebar pula penyebarannya, maksudnya kemungkinan munculnya harga tersebut dalam interval sangatlah besar. Namun sebaliknya jika nilai σ kecil, kemungkinan harga yang dimaksud terpusat pada m . Lihat gambar 2-4.

⁴⁾ ibid, hal. 81

Semua kurva normal mempunyai sifat bahwa luasan kurva yang bersebelahan satu standard deviasi dari m (luasan dalam interval $m \pm \sigma$) mengandung 68,3 % luas total kurva, luasan dalam interval $(m \pm 2\sigma)$ mengandung 95,5 % luas total kurva dan luasan dalam interval $(m \pm 3\sigma)$ mengandung 99,7 % luas total kurva. Jadi nilai σ dapat ditentukan dengan mengambil 68,3 % dari luas total kurva disekitar mean.

Fungsi kerapatan probabilitas (pdf) dari bentuk kurva normal standard adalah :

$$P_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2-12)$$

Untuk luas kurva pada interval $(-k\sigma, +k\sigma)$ adalah :

$$P(-k\sigma \leq x \leq +k\sigma) = \int_{-k\sigma}^{+k\sigma} \frac{e^{-x^2/2\sigma^2}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} dx \quad (2-13)$$

dengan menggunakan total error function (erf x) didapat :

$$P(-k\sigma \leq x \leq +k\sigma) = \text{erf}\left(\frac{k}{\sqrt{2}}\right) \quad (2-14)$$

Untuk luas normal tidak standard diperoleh :

$$P(m - k\sigma \leq x \leq m + k\sigma) = \text{erf}\left(\frac{k}{\sqrt{2}}\right) \quad (2-15)$$

Dalam kenyataan secara praktis, yang diperoleh terlebih dahulu adalah kurva kerapatan probabilitas (pdf) dari suatu besaran yang merupakan turunan pertama terhadap besaran dari fungsi distribusi kumulatifnya (cpd). Seperti peninjauan pada penerimaan sinyal dalam komunikasi radio bergerak, kuat medan yang diperoleh dari percobaan dibentuk menjadi kurva distribusi secara kumulatif,

kemudian ditentukan pula kurva kerapatan probabilitasnya. Setelah itu baru didekati dengan menggunakan analisa sifat distribusi yang paling sesuai.

II.2.4.3. Distribusi Rayleigh

Fungsi kerapatan probabilitas Rayleigh sering digunakan pada analisa sinyal radio bergerak untuk mengidentifikasi *fast fading*, *short term fading*, dan *multipath fading*. Fungsi kerapatan probabilitasnya adalah :

$$P_x(x) = \frac{x}{2\sigma^2} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right] \quad ; x \geq 0 \quad (2-16)$$

nilai meannya adalah :

$$m = E[x] = \int_0^\infty x \cdot P_x(x) dx = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma \quad (2-17)$$

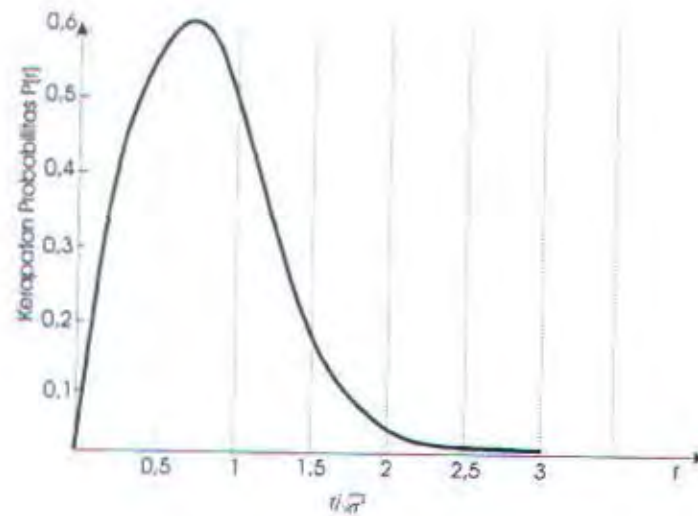
nilai rata-rata kuadratnya adalah :

$$E[x^2] = \int_0^\infty x^2 \cdot P_x(x) dx = 2\sigma^2 \quad (2-18)$$

nilai standard deviasinya adalah :

$$\sigma_r = \sqrt{E[x^2] - E^2[x]} = \sqrt{2 - \frac{\pi}{2}} \sigma \quad (2-19)$$

dengan σ adalah standard deviasi dari besaran yang terdistribusi normal. Secara matematis dapat dibuktikan bahwa dua besaran yang tidak saling berkorelasi dan masing-masing terdistribusi Rayleigh. Kurva pdf Rayleigh ditunjukkan pada gambar 2-5.



Gambar 2-5⁵⁾
KURVA DISTRIBUSI RAYLEIGH

Dari gambar di atas terlihat bahwa nilai maksimum $P_x(x)$ tidak terletak pada nilai m , tetapi agak bergeser disebelah kirinya. Dengan mensubstitusikan persamaan (2-16) ke persamaan (2-17) diperoleh distribusi Rayleigh yang dinyatakan dalam mean m sebagai berikut :

$$P_x(x) = \frac{\pi \cdot x}{2m^2} \exp\left[-\frac{\pi \cdot x^2}{4m^2}\right] \quad (2-20)$$

Besaran σ_r dan mean m diperoleh dengan menggunakan persamaan (2-17) dan (2-19) karena harga σ langsung didapat dari kurva, nilai yang memaksimalkan fungsi.

⁵⁾ William C. Y. Lee, Loc.cit, hal. 28

II.2.4.4. Distribusi Rician

Fungsi kerapatan probabilitas Rician biasanya digunakan untuk menganalisa gelombang langsung dan gelombang pantulan dari sistem komunikasi bergerak. Fungsi kerapatan probabilitasnya adalah :

$$P(r) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{r^2}} \left[\frac{r}{2\pi a} \right]^{-1/2} \exp\left(-\frac{(r-a)^2}{r^2}\right) \quad (2-21)$$

dimana :

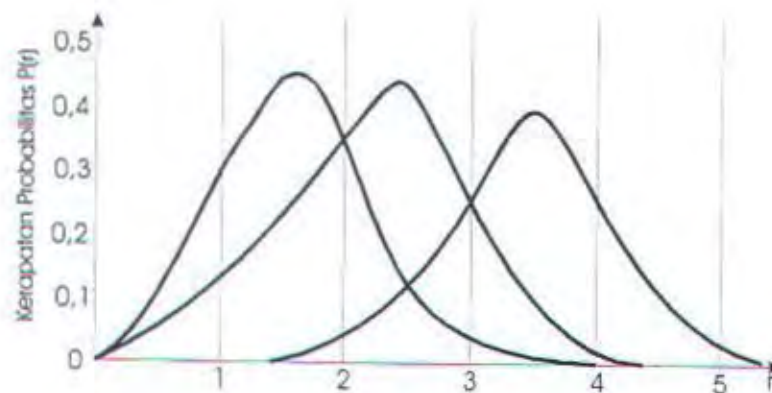
r = pembawa (envelope) dari sinyal fading

r^2 = rata-rata dari sinyal fading

a = amplitudo gelombang langsung

$\sqrt{r^2}$ = harga *rms* dari r

Adapun gambar kurva distribusi pdf-nya terdapat pada gambar 2-6.



Gambar 2-6⁶⁾
KURVA DISTRIBUSI RICIAN

⁶⁾ op.cit, hal. 29

Dari penjelasan di atas dapat disimpulkan bahwa jika harga a besar, maka persamaan (2-21) menjadi distribusi Gaussian (normal). Sedangkan jika komponen gelombang langsung tidak ada, dan nilai a mendekati nol, maka persamaan menjadi distribusi Rayleigh.

II.1.4.5. Distribusi Log-Normal

Log-normal pdf digunakan untuk mengidentifikasi fading lambat atau local mean pada pengamatan sinyal radio bergerak. Fungsi kerapatan probabilitasnya adalah :

$$P(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{(y-m)^2}{2\sigma_y^2}\right) \quad (2-22)$$

dimana :

y = variabel log-normal (dB)

m = harga mean (dB)

σ_y = harga standard deviasi (dB)

Pada peninjauan karakteristik fading lambat (long term) dari sinyal radio bergerak, mula-mula kuat medan sinyal tersebut dikonversikan dalam satuan dB, kemudian dibuat distribusi kumulatifnya dan diambil turunan pertamanya terhadap besaran tertentu (y), untuk mendapatkan pdf-nya. Setelah itu kurva yang diperoleh menyerupai bentuk normal dan ditinjau dengan menggunakan sifat-sifat fungsi distribusi normal.

II.3. TEKNIK MULTIPLE ACCESS

Sistem radio pertama kali dirancang untuk mengirimkan dan menerima kanal tunggal atau frekuensi tunggal. Pemakaian kanal tunggal ini masih dominan digunakan pada aplikasi radio sampai saat ini. Pada sistem kanal tunggal komunikasinya bergantian dalam satu jalur, seperti pada sistem broadcast, taxi cab, dan sebagainya. Sistem kanal tunggal ini kurang efisien jika akan digunakan oleh banyak pemakai pada waktu yang bersamaan.

Untuk lebih mengefisienkan jalur komunikasi maka digunakan sistem *multiple access*. Dengan sistem ini beberapa pemakai (banyak frekuensi) dapat dikirim serentak dalam satu jalur komunikasi. Sistem multiple access radio mempunyai empat kelebihan dibanding sistem kanal tunggal, yaitu :

1. Sistem multiple access dirancang untuk mengirimkan beberapa pemakai secara serentak.
2. Komunikasi antar jalur pemakai pada kanal, pengaturannya disesuaikan dengan sistem akses, sehingga satu sama lain tidak saling mengganggu.
3. Jalur-jalur pemakai disatukan dalam jalur utama dan tidak ada ketentuan bahwa hanya bisa menghubungi satu jalur saja, tetapi jalur pemakai dapat berhubungan dengan jalur lainnya.
4. Jalur-jalur pemakai disalurkan sesuai permintaan.

Untuk merancang sistem multiple access harus diperhatikan dua hal utama sebagai berikut :

1. Strategy Multiplexing.

Yaitu bagaimana menggabungkan kanal individu ke dalam suatu spektrum radio yang dapat diterima secara serentak.

2. Channel Assignment.

Bagaimana para pemakai secara individu menuntut hubungan dengan jalur yang khusus.

Ada lima sistem multiple access yang digunakan untuk mengirimkan beberapa jalur informasi secara bersamaan, yaitu :

1. FDMA (Frequency Division Multiple Access).

Melayani panggilan dengan kanal yang berbeda.

2. TDMA (Time Division Multiple Access).

Melayani panggilan dengan time slot yang berbeda.

3. CDMA (Code Division Multiple Access).

Melayani panggilan dengan deretan kode yang berbeda.

4. PDMA (Polarization Division Multiple Access).

Melayani panggilan dengan deretan kode yang berbeda.

5. SDMA (Space Division Multiple Access).

Melayani panggilan dalam daerah yang berbeda yang dicakup dengan antena spot beam dalam frekuensi sama.

Pada sistem seluler hanya tiga bentuk multiple access yang digunakan yaitu : TDMA, CDMA, dan FDMA. Tetapi yang ditulis disini hanya yang berhubungan dengan masalah yang sedang dibahas yaitu CDMA.

II.3.1. CDMA (Code Division Multiple Access)

Industri komunikasi dihadapkan dengan permasalahan meningkatnya jumlah pemakai tetapi daerah band frekuensi yang tersedia terbatas. Untuk mengatasi hal ini industri harus menemukan suatu metoda yang dapat meningkatkan kapasitas kanal tanpa menurunkan kualitas pelayanan. Teknologi CDMA dapat digunakan untuk mengatasi masalah tersebut.

Dalam sistem CDMA menggunakan korelasi kode untuk membedakan pemakai yang satu dengan yang lain. CDMA menggabungkan beberapa pemakai yang mempunyai kode berbeda antar satu dengan lainnya, kemudian disatukan dalam jalur utama dan dikirim dengan frekuensi dan pada waktu yang sama. Dengan bandwidth yang cukup lebar pada sisi penerima sinyal-sinyal yang datang dibentuk kembali sesuai dengan sinyal yang diinginkan.



Gambar 2-7
ARSITEKTUR CDMA

Dari contoh gambar di atas terlihat bahwa ada tiga pemakai yang akan mengirimkan informasi. Informasi dari ketiga pemakai tersebut diubah dulu ke bentuk kode-kode yang berbeda-beda (digambarkan dengan titik, bintang dan kotak). Ketiganya digabungkan secara acak dalam satu jalur utama yang cukup lebar. Pada pihak penerimaketiga bentuk informasi tersebut disusun lagi sesuai dengan bentuk kode masing-masing.

Interferensi antara ketiga pemakai pada jalur utama, mungkin terjadi yang disebut *self interference*. Self interference ini membatasi jumlah pemakai (kapasitas kanal) yang secara serentak mengakses ke sebuah kanal dari CDMA. Oleh karena itu untuk meningkatkan kapasitas kanal perubahannya secara perlahan-lahan (*soft capacity*). Soft capacity ini dapat menurunkan kualitas sinyal.

II.4. TEKNIK SPREAD SPECTRUM

Perkembangan telekomunikasi radio dewasa ini akan menjadi pilihan utama, karena sistem komunikasi radio lebih fleksibel. Perkembangan telekomunikasi radio yang begitu pesat membutuhkan pengaturan pengalokasian frekuensi, karena band frekuensi cukup teratur. Para ahli akan mengembangkan sistem spread spectrum, dengan penggunaan bend frekuensi lebih efisien dan dapat memenuhi kebutuhan pemakai lebih banyak.

Teknik spread spectrum menggunakan bandwidth yang lebih lebar dari bandwidth sinyal informasi (biasanya 10^4 - 10^6 kali). Kelebihan teknik spread spectrum adalah memperkecil interferensi pada sistem lain, penolakan yang tinggi terhadap interferensi, akses jamak dan kemampuan lain. Teknik spread spectrum

telah dibuktikan secara teoritis oleh seorang pakar statistik telekomunikasi, yaitu C. E. Shannon. Dalam penelitiannya dia membuktikan bahwa kemampuan kanal dalam mengirim sinyal informasi dengan probabilitas yang kecil dapat diwujudkan dengan memperlebar bandwidth walaupun nantinya S/N (signal to noise ratio) akan menurun karena pengaruh pelebaran bandwidth. Hasil pembuktian Shannon dapat ditulis secara matematis sebagai berikut :

$$C = W \log_2 (1 + S/N)$$

dimana :

C = kapasitas kanal transmisi (bit per detik)

W = bandwidth transmisi (Hz)

S = daya sinyal (watt)

N = daya noise (watt)

Dari persamaan di atas terlihat bahwa untuk meningkatkan kapasitas kanal dengan S/N tetap kecil, maka bandwidth harus diperbesar. Shannon juga mengemukakan bahwa sebuah kanal dapat mentransmisikan informasi dengan probabilitas yang kecil, jika informasi tersebut dikodekan dengan tepat dan laju informasi tidak melebihi kapasitas kanal, sekalipun kanal memuat noise acak. Kedua rumusan Shannon ini merupakan teori dasar informasi yang merupakan dasar bagi teknik spread spectrum.

Dalam sistem spread spectrum, ada dua kriteria yang harus dipenuhi antara lain :

1. Bandwidth sinyal transmisi lebih besar dari bandwidth atau laju informasi yang dikirim.

2. Lebih lebarnya bandwidth sinyal transmisi disebabkan oleh proses penebaran (spreading) pada pemancar yang melibatkan deretan kode yang bebas terhadap sinyal informasi dan dapat dikenal oleh penerima.

Menurut teknik modulasinya, sistem spread spectrum diklasifikasikan menjadi beberapa jenis, yaitu :

1. Direct Sequence Spread Spectrum.
2. Frequency Hoping Spread Spectrum.
3. Time Hoping Spread Spectrum.
4. Chirp Spread Spectrum.
5. Hybrid Spread Spectrum.

II.4.1. Direct Sequence Spread Spectrum

Direct sequence spread spectrum adalah proses penebaran sinyal informasi ke suatu band frekuensi yang jauh lebih besar dari bandwidth sinyal informasinya. Pada sistem direct sequence, sinyal informasi dijumlahkan langsung dengan sinyal pseudonoise. Proses penjumlahannya ada dua cara, yaitu :

1. Secara langsung yang disebut metoda modulasi kode langsung.
2. Secara tidak langsung yang disebut metoda modulasi kode tidak langsung.

Perbedaan dari kedua cara ini yaitu pada saat proses modulasi dengan sinyal carrier. Pada metoda modulasi kode langsung proses modulasi dengan sinyal carrier dilakukan setelah sinyal informasi biner dijumlahkan dengan sinyal pseudonoise secara modulo 2. Hasil penjumlahan yang berupa deretan sinyal pseudonoise biner kemudian dimodulasikan dengan sinyal carrier dengan teknik

modulasi digital. Pada metoda modulasi kode tidak langsung sinyal informasi biner dimodulasikan dulu dengan sinyal carrier, kemudian hasilnya dijumlahkan secara modulo 2 dengan sinyal pseudonoise. Blok diagram dari kedua cara tersebut ada pada gambar di bawah. Percobaan direct sequence pertama kali dilakukan oleh De Rosa dan Rogoff pada tahun 1949 yang membangun suatu link antara New Jersey dan California.

Kelebihan dari sistem direct sequence ini adalah :

- Tahan terhadap noise dan sebagai anti jamming.
- Dideteksinya paling susah.
- Tahan terhadap multipath.

Kelemahan dari sistem direct sequence ini adalah :

- Membutuhkan bandwidth kanal yang lebar dengan distorsi fasa yang kecil.
- Waktu akuisisi lama.
- Memerlukan code generator yang tepat.
- Masalah near – far.

II.4.2. Frequency Hoping Spread Spectrum

Pada frequency hopping spread spectrum, bandwidth kanal dibagi menjadi beberapa slot frekuensi yang bersebelahan dengan frekuensi carrier diubah-ubah oleh kode penyebaran secara diskrit dengan probabilitas yang ditentukan. Contoh bandwidth sinyal informasi 10 KHz dan ada 100 kanal untuk pindah, $N = 100$ sehingga bandwidth frequency hopping, $B_{ss} = 1$ MHz. Spektrum diperlebar dari 10 KHz (tanpa lompatan) menjadi 1 MHz (dengan lompatan frekuensi).

Dalam setiap selang waktu pensinyalan, sinyal yang dipancarkan menempati satu atau lebih slot frekuensi yang tersedia yang diatur secara pseudonoise menurut keluaran PN generator. Ada dua macam klasifikasi FH, yaitu :

1. Lompatan frekuensi cepat (fast frequency hopping / FFH).
2. Lompatan frekuensi lambat (slow frequency hopping / SFH).

Pada FFH kecepatan lompatan frekuensi lebih besar dari kecepatan transmisi bit informasi karena setiap satu simbol yang dipancarkan, ada dua atau lebih lompatan frekuensi. Pada SFH kecepatan lompatan frekuensi lebih kecil daripada kecepatan transmisi bit informasi karena setiap lompatan frekuensi ada dua simbol atau lebih yang dipancarkan.

Kelebihan dari frequency hopping adalah :

- Jumlah penebaran paling besar.
- Dapat diprogram untuk menghilangkan bagian-bagian spektrum.
- Pengaruh masalah near - far sedikit.

Kelemahan dari frequency hopping adalah :

- Memerlukan pembagi frekuensi yang kompleks.
- Memerlukan koreksi kesalahan.

II.4.3. Time Hopping Spread Spectrum

Pada sistem time hopping spread spectrum terjadi perubahan pada interval waktu dan kecepatan informasi. Pada sistem ini informasi yang awalnya ditransmisikan dengan laju data R dan interval waktu transmisi T diubah

sehingga mempunyai interval waktu yang lebih lama T_s dan laju informasinya menjadi lebih kecil R_s daripada laju bit informasi R .

Pada interval waktu T_s data dikirimkan dalam bentuk burst dan ditransmisikan dalam time slot yang dipilih secara acak. Interval waktu antara sinyal burst dapat diubah-ubah. Laju informasi R_s akan lebih kecil dari kecepatan bit informasi R .

Kelebihan sistem time hopping adalah :

- Efisiensi bandwidth tinggi.
- Implementasi lebih sederhana dibanding frequency hopping.
- Berguna ketika pemancar dibatasi daya rata-rata, bukan dibatasi daya puncak.
- Masalah near - far dihilangkan dalam suatu sistem terkoordinasi.

Kelemahan sistem time hopping adalah :

- Waktu akuisisi lama.
- Diperlukan koordinasi kesalahan.

II.5. KONSEP CDMA

Kapasitas kanal merupakan salah satu faktor yang sangat penting dalam perencanaan suatu jaringan telekomunikasi. Dengan menggunakan teknik CDMA permasalahan kapasitas kanal dapat diatasi. Teknologi CDMA telah digunakan sejak Perang Dunia II untuk sistem keamanan militer, kemudian digunakan untuk jalur komunikasi lintas tipis.

CDMA dikembangkan dengan tujuan mendapatkan kapasitas yang besar dengan bandwidth yang terbatas tanpa menurunkan kualitas. Pada teknik CDMA informasi yang telah dikodekan menempati satu band frekuensi yang besar (spread spectrum). Dalam media transmisi informasi yang telah dikodekan tersebut menyerupai noise. Pada sisi penerima informasi tersebut dapat ditemukan kembali dengan menggunakan deretan pseudonoise yang sama yang digunakan dalam transmisi.

CDMA tidak mempunyai kemampuan sistem respon yang tajam, sebagai contoh jika jumlah pemakai meningkat, harga S/N akan turun, sehingga performance-nya akan menurun sampai S/N mendekati ambang batas. Tetapi jika jumlah pemakai lebih kecil dari kemampuan sistem sebenarnya maka kemampuan anti jamming bertambah besar.

Ada beberapa keunggulan sistem CDMA antara lain :

- Tahan terhadap gangguan frekuensi radio (anti jamming).

Pada sistem CDMA sinyal carriernya tidak dapat diramalkan karena dikirim secara pseudorandom, sehingga jammer tidak dapat mendeteksi sinyal informasi.

- Kemampuan anti interferensi.

Interferensi sinyal terjadi karena sinyal informasi yang diterima lebih dari satu sinyal, sehingga akan menimbulkan intermodulasi pada keluaran repeater.

- Low Probability of Intercept (LPI).

LPI terjadi apabila harga processing gain yang tinggi dan frekuensi sinyal carrier tidak dapat diramalkan karena semuanya dalam bentuk frekuensi domain dan daya penyebarannya yang tipis.

- Komunikasi yang aman.

Sinyal carrier yang ditransmisikan dalam bentuk acak sehingga sangat susah untuk disadap dan pada sistem modulasi carriernya memakai sandi rahasia dalam bentuk kode khusus, sehingga keamanan sinyal informasi terjaga.

Ada dua teknik yang biasa digunakan dalam sistem CDMA yaitu :

1. Sistem Direct Sequence CDMA.
2. Sistem Frequency Hopping CDMA.

II.5.1. Sistem Direct Sequence CDMA

Sistem direct sequence CDMA merupakan suatu proses penebaran sinyal informasi ke dalam band frekuensi yang jauh lebih besar dari band frekuensi sinyal informasi, dimana sinyal informasi yang dikirim diproses terlebih dahulu ke dalam bentuk kode tertentu. Pemrosesan dilakukan dengan cara mengkombinasikan sinyal informasi biner dengan sinyal pseudonoise yang mempunyai laju bit lebih tinggi dari laju bit sinyal informasi biner. Sebagai contoh, laju sinyal informasi biner adalah 10 Kbps, makabesarnya bandwidth yang diperlukan adalah 10 KHz. Jika setiap bit informasi dikodekan dengan 100 chip, maka akan diperoleh laju chip sebesar 1Mbps dan memerlukan bandwidth sebesar 1 MHz.

Perbandingan antara bandwidth spread spectrum dengan bandwidth sinyal informasi dapat dinyatakan sebagai *Processing Gain* (PG), dimana secara matematis dapat ditulis :

$$PG = 10 \log \left(\frac{B_{ss}}{B} \right)$$

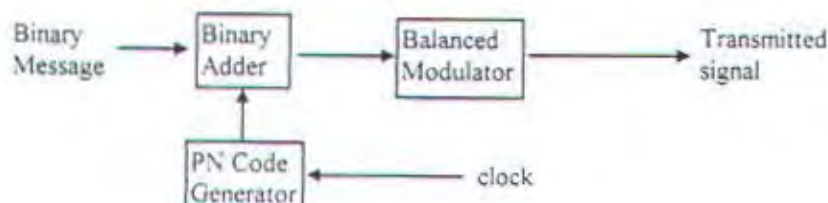
dimana : Bss = Bandwidth spread spectrum

B = Bandwidth sinyal informasi

Pada sistem ini performance semua unsur sama sehingga kapasitas sistem secara keseluruhan dapat maksimum.

II.5.1.1. Pemancar Direct Sequence

Prinsip dasar direct sequence dapat dilihat pada gambar 2-8. Dari gambar ini terlihat bahwa, sinyal informasi biner dijumlahkan secara modulo 2 dengan deretan sinyal pseudonoise periodik yang dibangkitkan pseudonoise code generator. Hasil dari penjumlahan ini kemudian dimodulasi dengan sinyal carrier dengan sistem modulasi digital. Sistem modulasi digital yang biasa digunakan adalah BPSK, karena :



Gambar 2-8
DIAGRAM BLOK SISTEM PEMANCAR DIRECT SEQUENCE

1. Sistem BPSK mempunyai P_e (Probability of error) lebih kecil dibanding sistem lain.
2. Sistem modulasinya lebih sederhana.
3. Sinyal carrier bisa ditekan, sehingga daya sinyal informasi lebih besar.

Sinyal-sinyal yang ditransmisikan dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$S(t) = C(t) \cdot d(t) \cos(\omega_c t + \phi)$$

dimana : $C(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k \cdot P_{rc}(t - T_c)$, merupakan deretan pseudonoise

C_k = deretan acak yang mempunyai harga (+1, -1)

P_{rc} = pulsa dengan durasi T_c

$D(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_k \cdot P_i(t - T)$, deretan sinyal informasi

II.5.1.2. Penerima Direct Sequence

Sistem penerima direct sequence harus memiliki kemampuan untuk mendeteksi adanya sinyal, despreading dan demodulasi sehingga sinyal informasi yang dikirimkan dapat diperoleh kembali. Blok diagram dari sistem penerima direct sequence dapat dilihat pada gambar 2-9.

Dari gambar tersebut, sinyal yang masuk dideteksi terlebih dahulu untuk mengecek keberadaan sinyal ini. Ada dua metode yang bisa digunakan, yaitu :

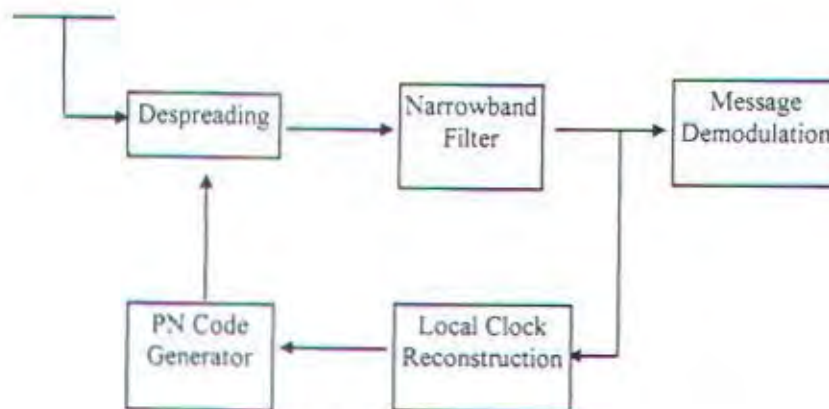
1. Metode aktif

Pada metode ini dalam mengecek keberadaan sinyal menggunakan parameter waktu dan frekuensi. Metode ini digunakan bila processing gain (PG) besar.

2. Metode pasif

Metode ini mengecek keberadaan sinyal hanya menggunakan parameter frekuensi. Metode ini digunakan bila harga PG kecil.

Pada proses despreading sinyal yang datang (spread spectrum) dikalikan dengan sinyal pseudonoise yang dibangkitkan oleh PN code generator. Apabila antara sinyal spread spectrum dengan sinyal pseudonoise sesuai maka sinyal dilewatkan pada narrowband filter, kemudian outputnya didemodulasi. Output dari narrowband filter ini digunakan juga untuk sinkronisasi antara sinyal spread spectrum dan sinyal pseudonoise.



Gambar 2-9
SISTEM PENERIMA DIRECT SEQUENCE

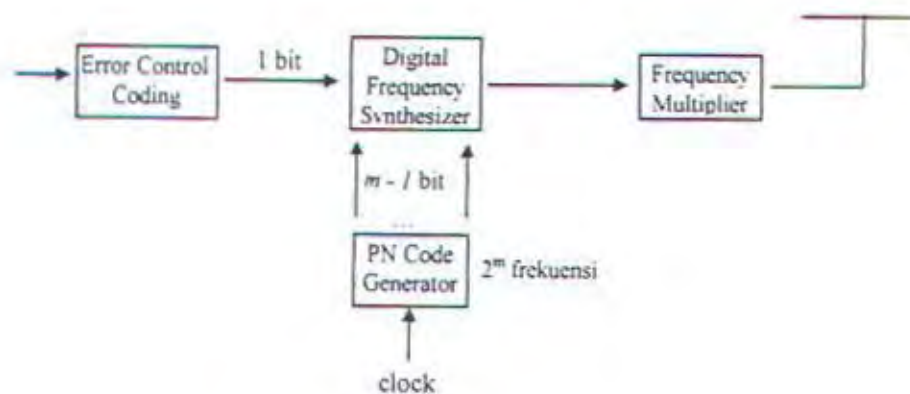
II.5.2. Sistem Frequency Hoping CDMA

Pada sistem frequency hopping bandwidth kanal yang tersedia dibagi-bagi menjadi beberapa slot frekuensi yang berdampingan. Setiap interval pensinyalan, sinyal yang dikirim dapat menempati satu atau lebih slot frekuensi. Pengaturan pengalokasian ke dalam slot frekuensi dilakukan secara pseudonoise sesuai output dari pseudorandom generator. Pada umumnya frequency hopping menggunakan detektor non koheren, sehingga dapat mengatasi kesulitan dalam menjaga fasa yang sama akibat perubahan frekuensi.

II.5.2.1. Pemancar Frequency Hoping

Blok diagram dari pemancar frequency hopping ditunjukkan pada gambar 2-10. Dari sini terlihat bahwa sinyal informasi yang akan dikirim dikoreksi terlebih dahulu dari kesalahan akibat interferensi dengan kanal lain, kemudian direkonstruksi sehingga performance sistem dapat meningkat. Digital frequency synthesizer menerima sinyal m bit yang berasal dari sinyal informasi dan sinyal $m-l$ bit yang berasal dari code generator.

Sinyal m bit dan $m-l$ bit ini mengatur lompatan frekuensi yang diberikan oleh digital frequency synthesizer. Jika bit informasi menghasilkan perubahan pergeseran frekuensi terkecil maka akan menghasilkan sinyal FSK. Bit $m-l$ dari pseudonoise code generator yang berubah secara acak akan melompatkan sinyal FSK dari kanal frekuensi satu ke kanal frekuensi lainnya sesuai dengan jangkauan frekuensi yang mungkin. Frequency multiplexer berfungsi untuk memperbesar bandwidth sehingga harga processing gain (PG) dapat meningkat.

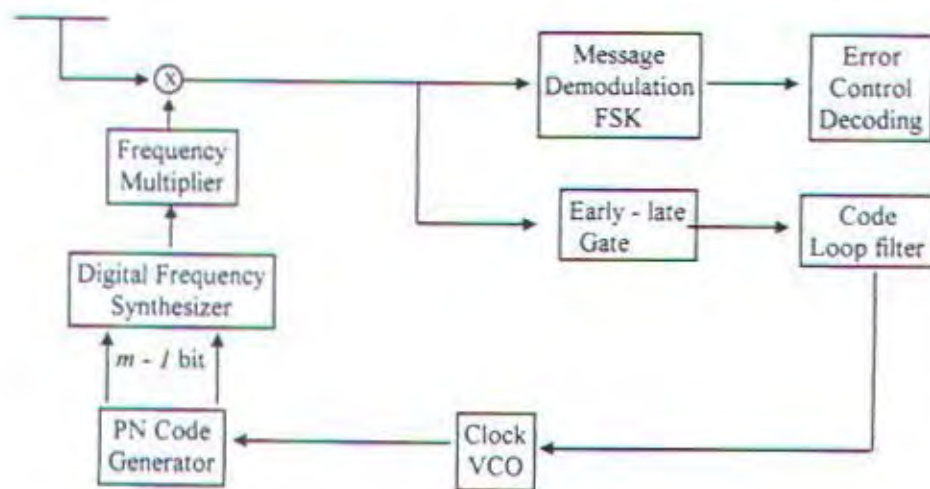


Gambar 2-10
PEMANCAR FREQUENCY HOPING

II.5.2.2. Penerima Frequency Hoping

Gambar sistem penerima frequency hopping diberikan pada gambar 2-11. Sinyal frequency hopping dibangkitkan secara lokal. PN code generator mengendalikan frequency synthesizer, kemudian sinyal yang dihasilkan oleh sebuah mixer dengan sinyal frekuensi yang diterima oleh antena. Jika kedua sinyal tersebut frekuensinya dapat berkorelasi (sesuai) maka akan menghasilkan sinyal biner FSK acak, kemudian melalui sebuah demodulator sinyal tersebut didemodulasi sehingga menghasilkan sinyal informasi.

Selain dilewatkan ke demodulator, sinyal tersebut dilewatkan ke early - late gate untuk mendapatkan sinyal kesalahan dan mengontrol frekuensi clock, juga untuk mensinkronkan sinyal yang datang dengan output frequency multiplier.



Gambar 2-11
DIAGRAM BLOK PENERIMA FREQUENCY HOPING

BAB III

SISTEM KOMUNIKASI RADIO PABRIK

Kanal radio ruang tertutup telah menjadi sebuah bidang penelitian aktif pada beberapa tahun belakangan ini. Pengukuran-pengukuran propagasi telah dilakukan untuk menentukan karakteristik propagasi UHF di dalam dan sekitar bangunan dan gedung perkantoran. Hasil-hasil yang ditulis di sini adalah pengukuran propagasi untuk pabrik.

Dalam sebuah disiplin teknik yang kelihatannya tidak berhubungan dengan komunikasi, saat ini ada sebuah dorongan yang begitu besar untuk membangun sebuah *intelligent manufacturing centers* ; pabrik-pabrik yang menggunakan teknologi *state-of-the-art* dan mesin-mesin yang dapat dikonfigurasi kembali untuk memperbaiki golongan kecil dan menengah dari proses pabrikasi makanan, barang-barang elektronik dan produksi logam. Telah diketahui bahwa dengan perencanaan yang baik pada pabrik di masa depan, tingkat penurunan biaya dapat diwujudkan untuk banyak golongan dari proses operasi pabrik. Dengan penghematan biaya seperti itu, tidaklah mengejutkan jika pabrik-pabrik domestik sedang direnovasi dengan mesin-mesin otomatis, dan sebuah sisi baru akan dibangun dengan tingkat kepintaran otomatisasi yang sangat tinggi.

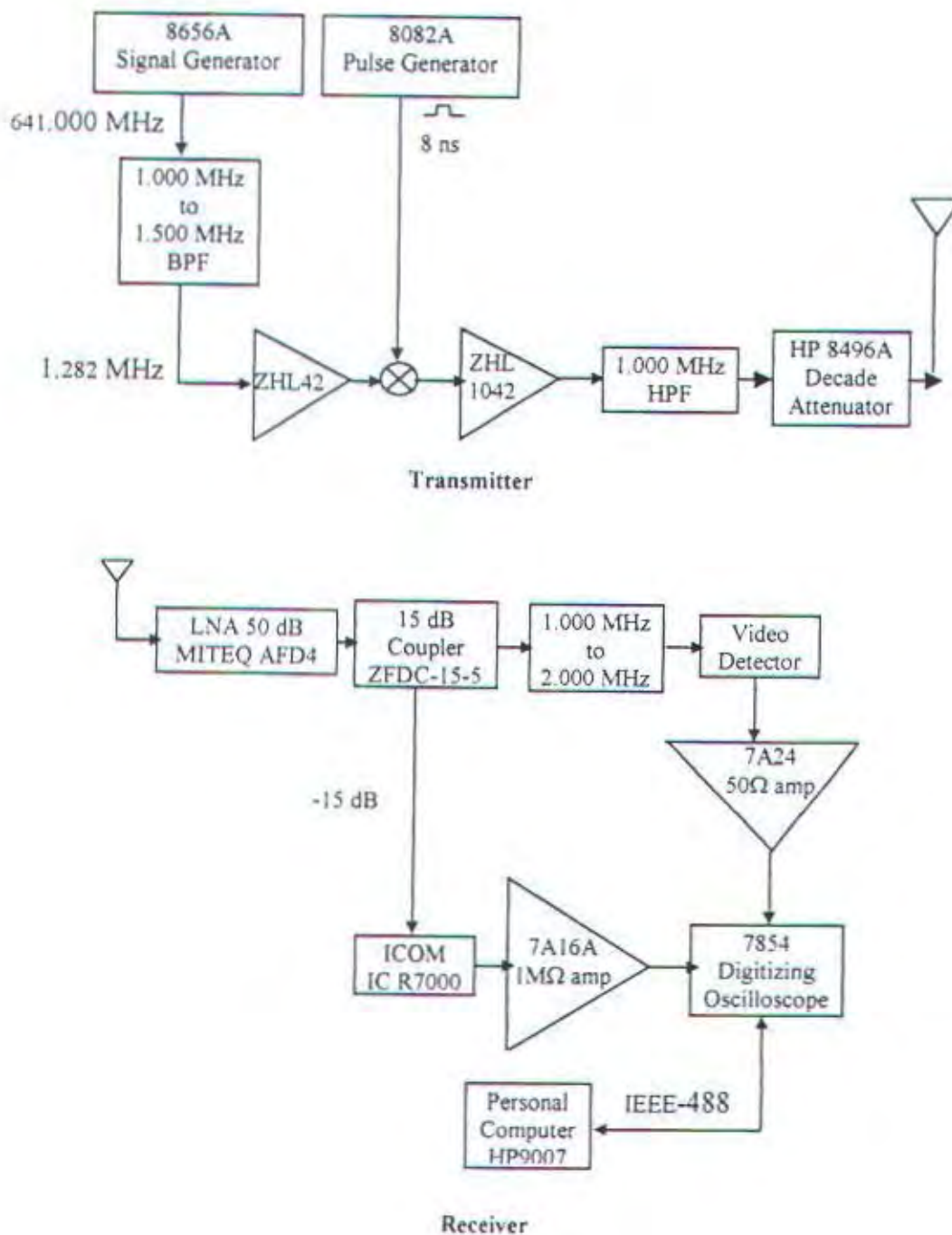
Pusat-pusat pabrikasi di masa depan akan memerlukan radio untuk mengontrol robot-robot bergerak (*autonomous guided vehicle* - AGV) yang dapat

ditempatkan dengan bebas ditempat kerja. Radio juga akan menampung komunikasi data / suara yang dapat dikonfigurasi kembali untuk bagian-bagian pabrik yang lain. Saat ini komunikasi antara komputer dan mesin-mesin otomatis hampir seluruhnya dikendalikan dengan menggunakan kabel. Karena propagasi radio dalam lingkungan pabrik belum dipahami dengan baik, maka untuk membangun kanal radio pabrik diperlukan suatu survey yang panjang untuk menentukan karakteristik propagasi kanal radio pabrik. Berikut ini dijelaskan metode dan data hasil pengukuran.

III.1 Pengukuran

Peralatan pengukuran telah disusun sedemikian rupa menggunakan sebuah pendekatan diagram blok langsung dan ditunjukkan secara skematik pada gambar 3-1. Pemancar menggunakan sebuah sumber frekuensi stabil dan mampu membangkitkan 1 W gelombang periodik (continuous wave carrier - CW carrier) atau pulsa pendeteksi berulang dengan durasi rms mendekati 8 ns pada periode perulangan pulsa variabel. Daya pancar diatur dengan sebuah *RF attenuator* untuk menjaga level sinyal yang diterima secara umum 30 sampai 40 dB diatas tingkat noise penerima untuk semua lokasi pengukuran.

Pemilihan frekuensi pembawa pada 1,300 MHz (tepatnya 1282 MHz) dibuat sebagai kompromi antara studi tentang propagasi radio ruang tertutup yang sudah ada saat ini pada pita frekuensi 800 / 900, 1500 dan 1700 MHz, yang ditargetkan untuk membangun pelayanan LAN dalam bidang telekomunikasi yang luas.



Gambar 3-1¹⁾
 DIAGRAM BLOK
 PERALATAN PENGUKURAN LINTASAN JAMAK PABRIK

¹⁾ T.S. Rappaport, " UHF Fading in Factories", IEEE JSAC Vol.7, No.1, Januari 1989

Peralatan penerima telah dirancang untuk mengijinkan baik data fading pulsa pita lebar (wideband pulse) dan pembawa kontinyu untuk direkam tanpa rekonfigurasi. Level sinyal pembawa kontinyu didapat dengan memonitor level DC dari tahap IF terakhir dari sebuah penerima komersial termodifikasi dengan sebuah AGC (Automatic Gain Control). Sebuah oscilloscope digital merekam pembacaan-pembacaan selubung dan menyimpan data tersebut pada sebuah disket untuk pemrosesan terakhir. Pengukuran-pengukuran tersebut akurat dan dapat diulang sampai pada $- / + 1.0$ dB. Pengukuran path loss sepanjang lintasan referensi ruang bebas 10λ (di dalam sebuah tempat pendaratan tangga yang luas dan di dalam sebuah daerah terbuka) secara konsisten di bawah 1 dB dari rugi-rugi ruang bebas teoritis.

Peralatan ditempatkan di atas gerobak pabrik yang terbuat dari logam dan dilengkapi dengan *pneumatic tires* dan perpanjangan kawat 14 m. Antena-antena discone, yang dikenal baik karakteristik broadband-nya, dirancang menggunakan sebuah sistem catu sederhana dan dilekatkan pada pipa PVC yang terikat pada gerobak. Tinggi antena-antena penerima dapat diatur dari 1,5 sampai 2,0 m.

III.1.1 Gambaran dari pabrik-pabrik yang diukur.

Pengukuran-pengukuran fading dilakukan pada lima pabrik yang beroperasi dengan seluruh peralatan secara penuh di Indiana pusat selama musim panas 1987. Gambaran singkat mengenai konstruksi dan tampak luar dari tiap-tiap fasilitas diberikan di sini. Atas permintaan dari pabrik-pabrik yang terlibat, nama dari pabrik tersebut tidak disebutkan di sini.

Site B : Pabrik pengolah makanan, dengan struktur banyak lantai

Pabrik ini dibangun pada tahun 1970 dan digunakan untuk memproduksi dan menyimpan makanan-makanan beku / dingin. Bangunan ini mempunyai dinding beton yang tebal, lantai beton, atap logam dengan tiang penopang baja, dan 74.000 meter persegi lantai bebas. Meskipun struktur ini terdiri dari lima lantai, lantai pertama bangunan menyatakan ruang utama yang luas dan di mana semua proses produksi dilakukan. Lantai utama dibagi dengan dinding-dinding beton bertulang menjadi lima daerah yang luas : kantor; gudang penyimpanan; produksi dan pemrosesan makanan; gudang-gudang pendingin; dan tempat beban. Daerah-daerah ini dihubungkan dengan sebuah gang selebar 6 m melintas sepanjang bangunan. Pipa-pipa baja tahan karat dan mesin-mesin logam menumpuk di dalam daerah pemrosesan makanan. Gudang-gudang penyimpanan terutama mengandung produksi kertas dan bahan-bahan makanan kering.

Site C : Pabrik perakitan Mesin, Struktur baru lantai tunggal

Pabrik ini dibangun tahun 1985 dan digunakan untuk memproduksi mesin-mesin besar dan komponen-komponen mesin. Bangunan ini mendekati persegi dan mempunyai lantai bebas seluas 100.000 meter persegi. Ada satu bagian internal utama, sebuah dinding tahan api dengan beton bertulang, yang membagi bangunan menjadi dua sama besar. Peralatan ini dilengkapi dengan teknologi perakitan state-of-the-art, seperti *automatic storage retrieval system*, *modular storage area*, dan *overhead crane*. Tiang-tiang baja penyangga atap yang rumit menyokong atap baja yang berlekuk-lekuk. Dinding-dinding tepi dibuat dari

panel-panel beton bertulang (tingginya 2,3 m dari tanah) dan disekat baja setebal 4 cm (2,3 m ke atap pada 10,7 m). Balok-balok I baja memanjang secara vertikal dari lantai kayu ke langit-langit untuk membentuk bay 15,2 x 15,2 m. Balok-balok baja tersebut mempunyai keliling 0,6 m.

Site D : Pabrik penghasil aluminium, struktur lantai tunggal

Pabrik ini di bangun tahun 1938 dan digunakan untuk menghasilkan aluminium extrud. Bangunan ini mempunyai 150.000 meter persegi lantai bebas yang terbagi scareely. Bagian-bagian dari pabrik digunakan untuk pabrikasi, extrusion, tube milling, heat treating/qenching, dan shipping batang-batang aluminium. Tumpukan tabung aluminium yang besar, blok-blok batang baja, overheadcrane, tungku, mesin pengebor dan sejumlah besar peralatan-peralatan logam lainnya ditemukan sepanjang pabrik. Pabrik didirikan di atas lahan berukuran 24,4 m x 6,1 m. Dinding-dinding sekeliling terutama dari batu bata, meskipun sebagian kecil dari pintu gesernya adalah kayu. Tinggi langit-langit bervariasi dari 12,5 sampai 18 m. Atapnya terbuat dari asbes/eternit dan disokong oleh pelat baja dan tiang penopang baja pejal.

Site E : Pabrik pengecoran logam, struktur lantai tunggal

Pengecoran logam dari pabrik pembuat mesin yang besar ditandai dengan site E. Berdiri tahun 1938, bangunan ini mencakup 28.000 m² area. Struktur lantai tingkat satu digunakan untuk semua fase produksi blok mesin logam dan merupakan salah satu dari lima pabrik pengecoran logam terbesar di Amerika

yang menghasilkan 600 blok mesin setiap hari. Bagian-bagian dari bangunan digunakan untuk pencampuran dan produksi inti keramik, dapur pelelehan dan pemurnian logam, tungku penyangga 100 ton, pembersihan /chipping, dan pemeriksaan. Meskipun tidak ada pembagian bangunan secara internal, sejumlah besar mesin-mesin seakan-akan menyekat bagian-bagian dalam pabrik tersebut.

Site F : Pabrik Pembuatan dan Perakitan Mesin, Struktur lantai tunggal

Bangunan ini, yang ditempatkan pada lokasi yang sama seperti pabrik pengecoran logam di atas, adalah sebuah fasilitas modern lantai tunggal seluas 21.000 m² yang digunakan untuk perakitan mesin secara otomatis. Gedung ini didirikan pada tahun 1973 dan mempunyai beberapa mesin pabrik baru yang bekerja secara otomatis. Bangunan ini mempunyai lantai kayu dan dinding sekelilingnya tersusun atas 15 cm blok beton dan diberi kerangka baja didalamnya. Seperti pada bangunan sebelumnya, sejumlah besar tumpukan barang dan mesin-mesin berat seperti *automated machines lines* dan *RF hardening machines* menjadikan jalur udara di dalam pabrik menjadi sangat sibuk.

III.1.2 Perencanaan Percobaan

Dari gambaran singkat mengenai pabrik-pabrik di atas (dan beberapa yang lain), terlihat adanya karakteristik fisik yang umum yang pasti ada pada sebagian besar pabrik, yaitu bahwa bangunan-bangunan pabrik mempunyai sedikit pembagian internal. Gang-gang diatur dalam suatu susunan, pola ortogonal (berpotongan) dan umumnya diapit oleh barang-barang atau mesin-mesin logam.

Pabrik-pabrik dipecah ke dalam daerah-daerah kerja lokal; jadi orang-orang dan peralatan-peralatan mesin dibatasi sampai daerah-daerah tertentu yang berbeda dengan penempatan secara acak di seluruh bagian pabrik. Langit-langit terbuat dari logam dan disangga dengan tiang logam (baja). Dinding-dinding sekeliling dalam pabrik yang lebih baru terbuat dari baja atau beton bertulang baja, dimana untuk bangunan-bangunan yang lebih tua lebih banyak menggunakan kayu dan batu-batu kali.

Dari sini ditentukan empat tipe topografi pabrik yang umum terhadap semua peralatan dan fasilitas pabrik. Pengelompokan karakteristik fisik dari kanal radio ke dalam kategori-kategori adalah pendekatan yang digunakan oleh Turin, di dalam lingkungan radio urban dan yang digunakan di sini. Kategori-kategori topografi pabrik didefinisikan sebagai berikut :

- 1) *Line of Sight Path with Light Surrounding Clutter* : Lintasan-lintasan yang terdapat sepanjang gang-gang utama yang dikelilingi secara relatif oleh daerah-daerah penyimpanan kosong atau daerah dengan kerapatan kerja rendah (seperti sebuah bengkel mesin) dimana sebagian besar *scatterer* (penghambur gelombang) lebih rendah dari tinggi antena pemancar dan penerima.
- 2) *Line of Sight Path with Heavy Surrounding Clutter* : Lintasan-lintasan yang terdapat sepanjang gang-gang dalam sebuah gudang penyimpanan yang baik atau sepanjang gang-gang dari sebuah daerah perakitan otomatis dimana sejumlah logam yang cukup berarti

banyaknya ditempatkan pada ketinggian yang lebih besar dari antena penerima.

3) *Obstructed Path - Light Surrounding Clutter* : Lintasan-lintasan seperti ini ada ketika sebuah lintasan langsung (LOS) terhalangi oleh barang-barang atau mesin-mesin yang mendekati sama dengan tinggi antena penerima. Lintasan radio seperti itu umumnya akan ada melintasi sebuah bengkel mesin atau sebuah daerah perakitan manual.

4) *Obstructed Path - Heavy Surrounding Clutter* : Lintasan-lintasan seperti itu ada di seluruh daerah pabrik ketika jalur udara sibuk, seperti dalam pabrik pengecoran logam, melintasi sebuah daerah perakitan otomatis, atau antara gang-gang dalam sebuah gudang penyimpanan.

Karena sebagian besar struktur bangunan yang dikunjungi adalah bertingkat satu dan mempunyai sedikit pembagian ruangan, karakteristik propagasi antara lantai-lantai atau melalui dinding-dinding tidak diselidiki.

Beberapa percobaan propagasi dilakukan dalam tiap-tiap kategori topografi dalam tiap-tiap pabrik. Percobaan ini dirancang untuk menentukan karakteristik rugi-rugi lintasan (*path loss*), fading sesaat (*temporal fading*), *shadow fading*, dan fading pemisahan skala kecil. Pengukuran-pengukuran lintasan jamak wideband secara luas dengan memakai pulsa probe 10 ns juga diberikan. Pengaturan dibuat dalam semua pabrik untuk mengumpulkan data *path loss*, fading sesaat, *shadow fading*, dan fading pemisahan skala kecil, selama periode kerja yang pelan sehingga pengukuran tidak akan bercampur dengan

operasi pabrik secara normal. Pengukuran fading sesaat dilakukan dalam *site E* dan *F* selama kondisi kerja normal.

Untuk semua pengukuran, gerobak pemancar ditempatkan dalam sebuah lokasi yang bebas dari rintangan-rintangan yang tiba-tiba, pada pusat dari *site* lokal yang akan dites yang sudah dipilih, seperti ditengah-tengah dari perpotongan dua gang utama. Tinggi antenna pemancar adalah 2 m di atas lantai. Untuk tiap-tiap kategori topografi dalam tiap-tiap pabrik, tiga lokasi pengukuran dipilih yang mempunyai tingkat jarak pemisahan pemancar-penerima antara 10 dan 80 m. Gerobak penerima ditempatkan pada sebuah gang atau jalur lintasan kendaraan lain yang umum dalam topografi pabrik yang ditentukan. Tinggi antenna penerima adalah 2 m tetapi diturunkan sampai 1,5 m selama percobaan diversiti tinggi antenna (yang tidak dibahas di sini).

Pada tiap-tiap lokasi pengukuran, tiga percobaan CW fading dibuat sepanjang dua lintasan yang ditempatkan pada pusat dan pada sebarang sisi dari gang tersebut. Setiap percobaan dilakukan dengan mendorong gerobak penerima sepanjang jalur 1,3 m sementara 128 pembacaan tegangan IF penerima diskrit direkam dan disimpan dalam jangka waktu 5 detik. Pengukuran pertama dilakukan di pusat dari gang dengan tinggi antenna 2 m. Percobaan kedua menggunakan jalur pusat gang yang sama dengan tinggi antenna dikurangi menjadi 1,5 m. Percobaan ketiga dilakukan dengan tinggi antenna 2 m pada sebuah jalur yang ditempatkan pada ujung kiri atau kanan dari gang-gang yang sejajar dengan jalur pusat. Ini bersesuaian dengan jarak 1 sampai 3 m antara jalur-jalur. Dengan melakukan pengukuran dengan variasi jalur dan tinggi antenna, sebuah basis data

fading yang representatif dari penerimaan radio bergerak yang umum disusun dan diolah.

Sepanjang seluruh pabrik, dibuat jumlah pengukuran yang sama untuk kiri dan kanan gang, dan digunakan jumlah jalur yang sama yang tegak lurus dan radial ke suatu garis yang digambar dari pemancar ke penerima.

Dalam daerah gerakan kanal yang penting, seperti dibawah gerakan *overhead fan* atau di dekat gerakan *conveyor belt*, sebuah pengukuran 100 detik sekali jalan dari level sinyal CW yang diterima direkam pada laju sampling 10,24 Hz untuk menentukan statistik fading sesaat. Baik pemancar dan penerima tetap diam selama pengukuran.

Dalam pabrik *B*, *C* dan *D*, dilakukan 57 pengukuran profil lintasan jamak dan 1152 pengukuran selubung CW sesaat pada masing-masing dari empat topografi pabrik. Pada site *C*, pengukuran tambahan dibuat didalam sebuah gang sepanjang sebuah dinding beton bertulang tahan api (disebut sebagai dinding LOS). Karena perhatian bahwa pengukuran akan bercampur dengan operasi pabrik secara normal, dilarang membuat pengukuran dalam lintasan langsung (LOS) dan *obstructed-heavy clutter path topography* dalam site *E* dan *F*. Hasil percobaan dikumpulkan dalam sebuah kelompok data yang berisi lebih dari 20.000 pengukuran daya sinyal yang diterima dari 50 lokasi pabrik.

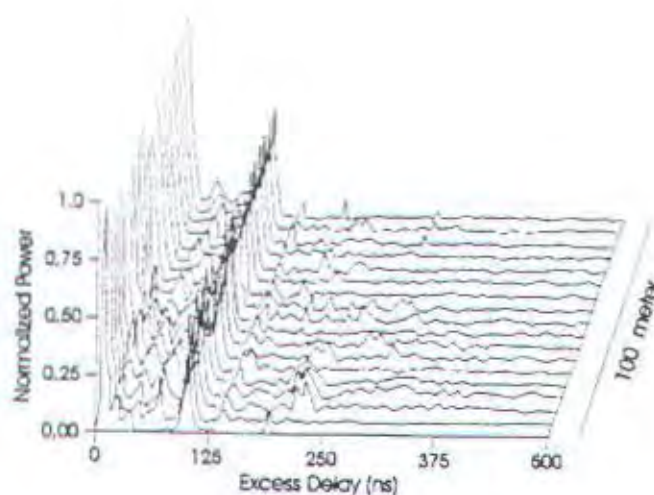
III.2 Data Hasil Pengukuran

Data propagasi yang lengkap ada dalam apendiks dari literatur ²⁾. Gambar 3-2 dan 3-3 menggambarkan fluktuasi acak yang umum dari komponen multipath sepanjang lintasan 1 m pada lokasi pengukuran dengan topografi LOS dan OBS.

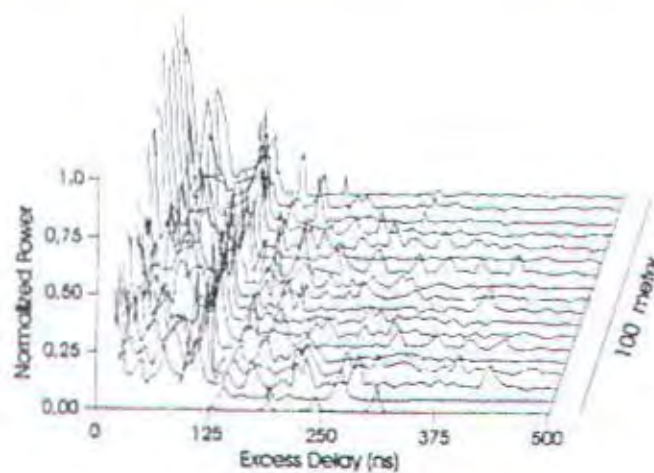
Mengamati fluktuasi acak dari banyak response impulse LOS, seperti ditunjukkan pada gambar 3-2, menunjukkan bahwa komponen multipath mengalami fading yang sangat kecil untuk gerakan kecil penerima. Secara khusus terlihat bahwa lintasan yang teramati pertama kali jarang bervariasi lebih dari satu atau dua dB sepanjang jalur $4,3 \lambda$. Pemantulan oleh langit-langit terlihat pada beberapa profile seperti pulsa pertama yang melebar dan yang datang 10-30 ns kemudian melalui lintasan yang panjang. Sebagian besar dari lintasan acak sangat mungkin sekali mengalami pantulan dari dinding-dinding pembatas dan mesin-mesin besar.

Response impulse terukur pada lintasan OBS, seperti ditunjukkan pada gambar 3-3, menunjukkan bahwa komponen multipath, khususnya yang datang terlambat pada profile, dapat mengalami fading sebanyak 10 dB untuk jarak yang pendek. Ini menandakan bahwa beberapa lintasan dalam topografi OBS adalah terbayangi atau tersusun atas banyak sub lintasan yang phase relatifnya berubah-ubah dengan sedikit gerakan penerima. Untuk beberapa pengukuran, pulsa-pulsa yang datang terlambat tidak benar-benar nampak untuk beberapa profile, dan kemudian muncul kembali dengan amplitudo berikutnya.

²⁾ T.S. Rappaport, "Characterizing the UHF Factory Multipath Channel," Purdue Univ. Dec. 1987



Gambar 3-2³⁾
FLUKTUASI ACAK UMUM RESPON IMPULSE DAYA DENGAN
PENERIMA DIGERAKKAN SEPANJANG LINTASAN 1 m DALAM
TOPOGRAFI LINTASAN LOS PADA SITE B



Gambar 3-3⁴⁾
FLUKTUASI ACAK UMUM RESPON IMPULSE DAYA DENGAN
PENERIMA DIGERAKKAN SEPANJANG LINTASAN 1 m DALAM
TOPOGRAFI LINTASAN OBS PADA SITE F

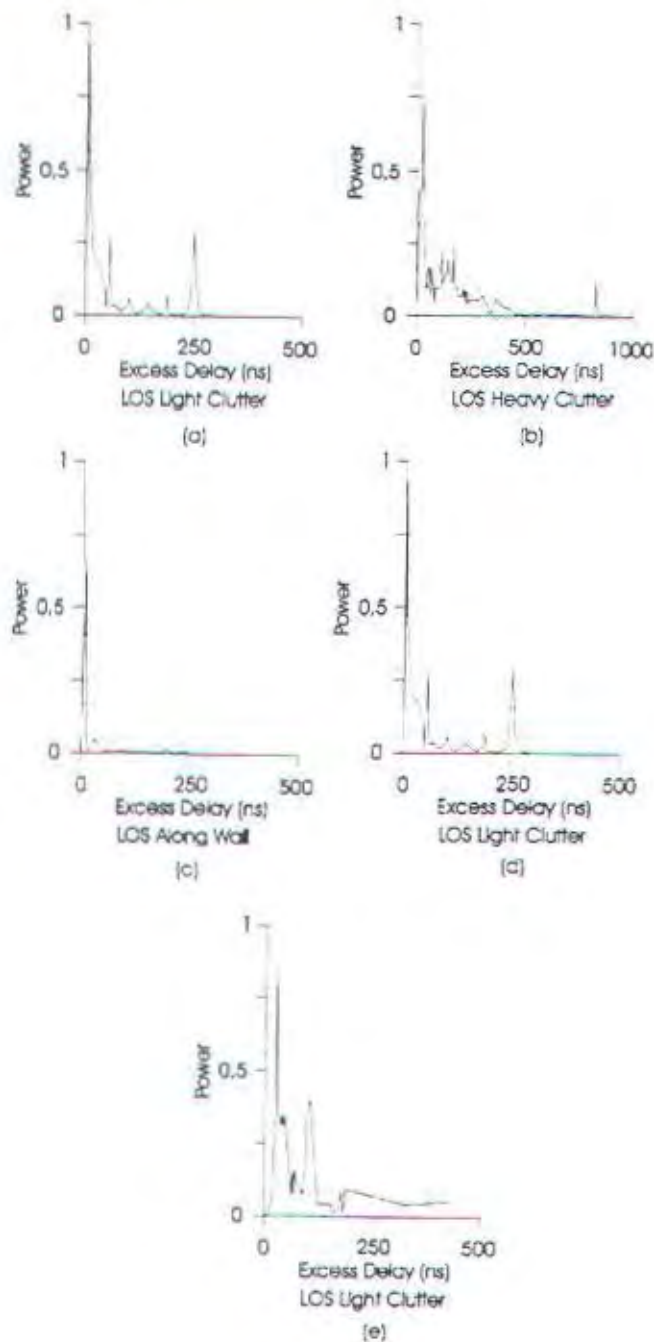
³⁾ T.S. Rappaport, "Characterization of UHF Multipath Radio Channel in Factory Buildings", IEEE Trans. On Ant. and Prop., vol. 37, No. 8, Agustus 1989

⁴⁾ ibid, hal. 1063

Gambar 3-4 menunjukkan multipath power delay profile rata-rata acak untuk topografi pabrik yang berbeda-beda. Bentuk dari delay profile pada gambar 3-4 sesuai dengan data yang diperoleh dari pengukuran. Khususnya untuk lintasan LOS mempunyai pulsa yang kuat dan jelas pada delay pertama yang teramati dan berangsur angsur turun untuk delay berikutnya. Tetapi dinding-dinding logam dan sebagian besar mesin dapat memberikan pantulan-pantulan acak yang berbeda dengan level sinyal pada tingkat dari komponen LOS. Gambar 3-4a direkam dari sebuah gudang di site B untuk jarak pemancar-penerima 18,2 m. Sinyal pada 40 ns disebabkan oleh pantulan dari dinding beton bertulang yang berjarak 6m dibelakang penerima; sinyal pada 250 ns adalah pantulan dari pintu dock baja yang berada 30 m dibelakang pemancar. Sebuah pengukuran untuk topografi LOS heavy clutter pada site C (gambar 3-4b) menunjukkan kehadiran sinyal (dengan amplitudo hanya 8 dB di bawah sinyal LOS) pada excess delay 800 ns. Sinyal ini diperkirakan akibat pantulan salah satu dinding pembatas pabrik.

Ketika lintasan gelombang radio sedikit terhalangi, pulsa yang teramati umumnya mempunyai amplitudo yang lebih besar jika dibandingkan dengan komponen multipath yang datang terlambat pada profile. Mayoritas dari daya multipath datang pada 50 sampai 250 ns setelah sinyal pertama yang teramati. Untuk kasus pada lintasan yang sangat terhalangi, sinyal yang pertama kali teramati umumnya lebih lemah daripada komponen yang datang 25-75 ns kemudian. Dalam beberapa kasus, amplitudo dari sinyal multipath besarnya satu atau dua dB dari sinyal yang lain dan tidak nampak berkurang terhadap delay sampai beberapa ratus nanosecond. Lintasan-lintasan yang tegak lurus dengan

halangan yang besar menghasilkan mayoritas sinyal yang datang antara 100 sampai 400 ns setelah sinyal pertama teramati.



Gambar 3-4⁵⁾
RESPON IMPULSE DAYA RATA-RATA ACAK DARI BERBAGAI
TOPOGRAFI

⁵⁾ ibid, hal. 1064

III.2.1 Hasil-hasil Pengukuran Path Loss

Path Loss absolut (PL) umumnya bertambah terhadap jarak (d), yaitu :

$$PL(d) = \alpha \cdot d^n \quad (3-1)$$

dimana n adalah eksponen yang berusaha didapatkan. Ketika diplot pada kertas log-log, hubungan eksponensial antara daya dan jarak adalah berupa garis lurus. Harga median path loss untuk semua pengukuran yang dilakukan menggunakan perhitungan lintasan (link budget) sebagai berikut :

$$PL(dB) = P_t(dBm) - A_t(dB) - P_{r,median}(dBm) - PL_{10\lambda}(dB) \quad (3-2)$$

dimana :

P_t adalah daya pemancar, umumnya 10 dBm untuk pengukuran CW

A_t adalah harga redaman pemancar

$P_{r,median}$ adalah median dari level daya yang diterima dari seluruh hasil pengukuran yang dilakukan

$PL_{10\lambda}$ adalah 37,8 dB.

Untuk semua pabrik dan topografi, didapatkan \hat{n} , estimasi rata-rata kuadrat minimum linier dari harga eksponen pada persamaan (3-1), standard deviasi dari hasil estimasi (σ), dan koefisien korelasi dari PL terhadap jarak. Hasil-hasil ini diberikan pada tabel 3-1 dan 3-2.

Gambar 3-5 menunjukkan grafik path loss terhadap jarak sebagai fungsi dari topografi pabrik untuk semua data. Karena pengukuran dibuat 10λ relatif terhadap acuan ruang bebas, harga x yang memenuhi hukum deret pangkat pada gambar 3-5 adalah $x = 2,3$ m. Tiap-tiap titik pada grafik menggambarkan median

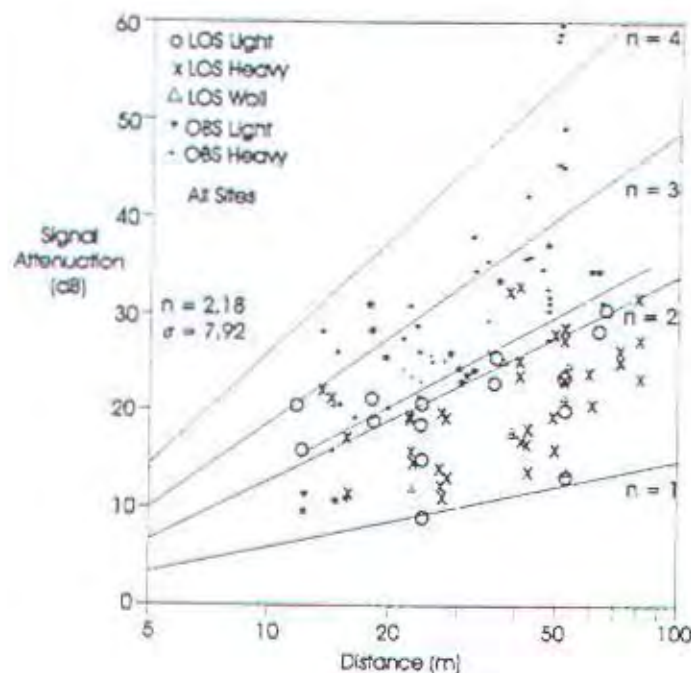
dari level sinyal yang diterima dari sebuah pengukuran yang dilakukan relatif terhadap lintasan ruang bebas 10λ . Dari tabel 3-1 terlihat bahwa pabrik *C* dan *F* memberikan redaman yang lebih kecil daripada bangunan yang lain.

Tabel 3-1
Eksponen Path Loss sebagai Fungsi Jenis Pabrik

Factory	\hat{n}	σ (dB)	No. of measurement runs	Correlation Coefficient
Site B	2,39	10,2	33	0,94
Site C	1,89	5,55	41	0,98
Site D	2,43	7,94	34	0,96
Site E	2,12	8,03	18	0,96
Site F	1,92	4,79	17	0,98

Tabel 3-2
Eksponen Path Loss sebagai Fungsi Topografi Pabrik

Factory Topografi	\hat{n}	σ (dB)	No. of measurement runs	Correlation Coefficient
LOS light clutter	1,79	4,55	26	0,98
LOS heavy clutter	1,79	4,42	43	0,98
LOS along wall	1,49	3,90	8	0,98
OBS light clutter	2,38	4,67	23	0,99
OBS heavy clutter	2,81	8,09	43	0,97
All Topographies	2,18	7,92	135	0,96



Gambar 3-5⁶⁾
PATH LOSS SKALA BESAR PADA SEMUA SITE

Ini disebabkan oleh pemantulan dari kandungan logam yang sangat besar yang digunakan dalam konstruksi pada bangunan yang lebih baru. Site D, pabrik tertua yang diukur, dibangun dengan menggunakan bahan utama kayu dan batu. Sebagian besar pengukuran dalam site B dilakukan dalam gudang penyimpanan dengan produksi kertas dan bahan makanan. Bangunan-bangunan ini menunjukkan lebih banyak redaman yang disebabkan oleh alam non konduktif dari bangunan dan barang-barang yang ada.

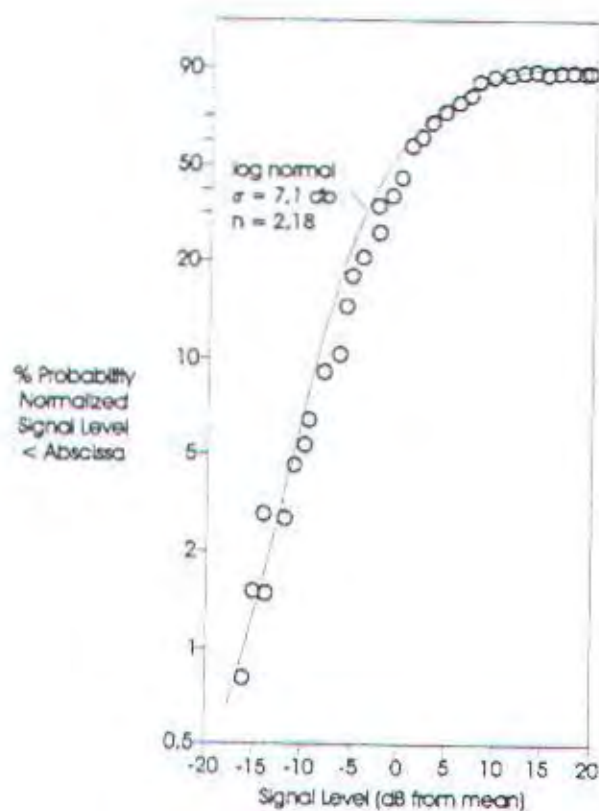
Bukanlah sesuatu yang mengejutkan, lintasan LOS diredam lebih kecil dari lintasan yang terhalangi. Dalam lingkungan pabrik, lintasan LOS terjadi di dalam daerah terbuka; daerah kerja yang terpisah yang mengandung sangat sedikit

⁶⁾ T.S. Rappaport, " UHF Fading in Factories", IEEE JSAC Vol.7, No.1, Januari 1989

peralatan berat yang menyebabkan bayangan, atau sepanjang gang-gang yang diapit oleh sebagian besar mesin dan peralatan penyimpanan. Data yang ada menunjukkan harga eksponen kira-kira 1,8 untuk lintasan LOS pabrik, sementara lintasan sepanjang dinding diredam terhadap jarak sampai pangkat 1,5. Pengukuran lain yang dilakukan oleh Alexander di dalam bangunan terbuka menunjukkan harga eksponen path loss 1,2 dan 2,5.

Untuk lintasan-lintasan yang terhalangi, efek dari pembayangan menentukan path loss untuk lokasi tertentu. Tetapi seperti ditunjukkan pada tabel 3-2, eksponen path loss yang umum adalah 2,4 untuk light clutter obstructed path dan 2,8 untuk heavy clutter obstructed path. Secara keseluruhan, eksponen path loss untuk pabrik adalah fungsi jarak dengan pangkat 2,18, atau mendekati ruang bebas.

Ini jelas dari gambar 3-5 bahwa varian dari median lokal bertambah dengan semakin bertambahnya jarak pemancar-penerima, dan bahwa varian ini lebih besar untuk lintasan terhalangi. Lebih jauh lagi, pada heavy clutter obstructed path, path loss bertambah lebih cepat dengan jarak pemancar-penerima yang lebih besar. Pengamatan ini serupa dengan yang dibuat oleh para peneliti dalam kanal radio bergerak UHF dimana, dalam kawasan metropolitan bahwa varian dari rata-rata bertambah dan path loss bertambah bila jarak lintasan lebih besar. Kita percaya bahwa kenaikan varian dan path loss terhadap jarak disebabkan karena pembayangan dari sejumlah besar mesin yang ada sepanjang lintasan terhalangi.



Gambar 3-6⁷⁾
DISTRIBUSI KUMULATIF DARI LEVEL SINYAL SKALA BESAR
DI SEKITAR NILAI RATA-RATA

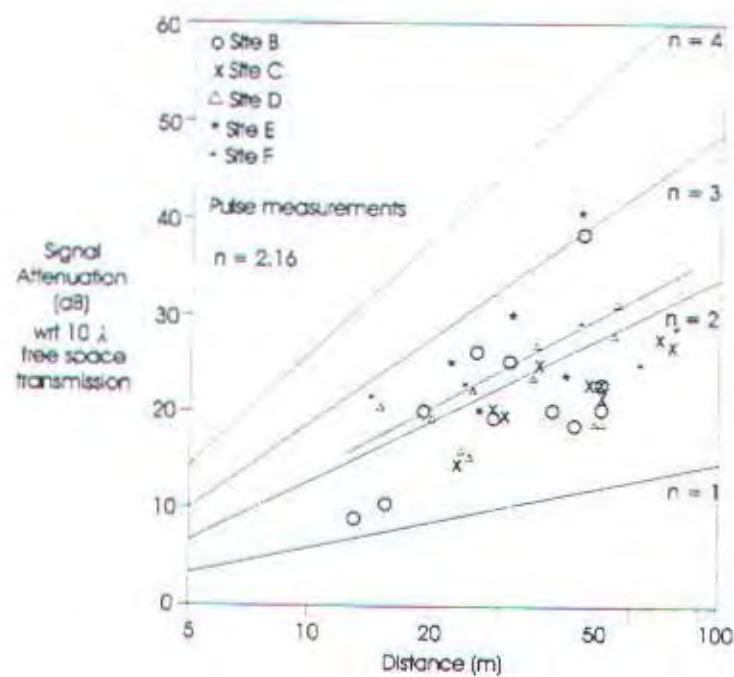
Meskipun varian dari path loss skala besar adalah fungsi jarak dan topografi pabrik, itu sangat berguna untuk mendapatkan distribusi pendekatan dari semua variasi level sinyal sekitar rata-rata dari path loss skala besar. Ini mungkin dipenuhi dengan mengurangi level sinyal rata-rata (yang ditentukan oleh \hat{n} , jarak pemancar-penerima, dan persamaan 1) dari semua data dan mengamati fluktuasi yang dihasilkan. Sebuah distribusi yang telah ditemukan untuk mencocokkan dengan kanal radio yang lain adalah distribusi log normal dengan varian konstan. Dengan menggunakan nilai $\hat{n} = 2,18$, path loss rata-rata

⁷⁾ ibid, hal. 44

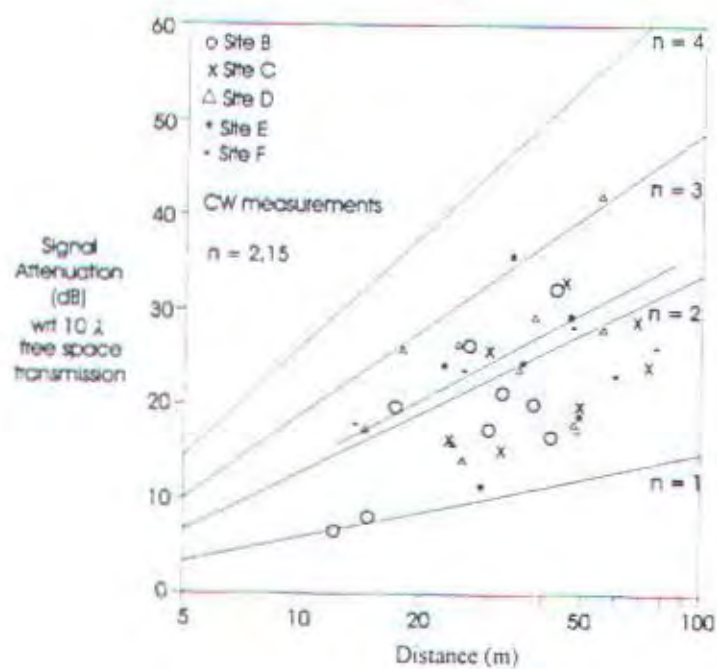
dikurangkan dari semua pengukuran CW dan fungsi distribusi kumulatif yang dihasilkan (CDF) diproses pada interval 1 dB. Gambar 3-6 menunjukkan path loss skala besar pabrik digambarkan dengan baik oleh distribusi log normal yang mempunyai varian 1 dB dari nilai statistik yang didapatkan dengan menggunakan *linear least square*. Distribusi untuk macam-macam topografi juga ditemukan mendekati distribusi log normal untuk harga \hat{n} dan σ seperti pada tabel 3-2.

Persamaan (3-18) dipakai untuk menghitung path loss (kadang-kadang disebut *large scale attenuation*) untuk semua pengukuran response impulse individu dan untuk tiap-tiap respon impuls acak rata-rata. Telah diamati bahwa pada 90 persen lokasi pengukuran, wide band path loss hanya bervariasi sedikit (paling besar hanya 3 dB) antara individual profile yang berjarak $\lambda/4$. Ini mengkonfirmasi sebuah dugaan yang dapat diterima bahwa fading lokal disebabkan terutama oleh fluktuasi penjumlahan phase dari lintasan-lintasan yang diterima dan tidak bervariasi dalam amplitudo multipath.

Data wide band path loss dari semua pabrik ditunjukkan pada gambar 3-7a dan sangat berkorelasi dengan jarak pemancar-penerima (dengan koefisien korelasi 0,98). Garis tebal dalam gambar menunjukkan kecocokan *least square linear* terhadap data, dan mengindikasikan hubungan antara path loss terhadap pangkat 2,16. Seperti ditunjukkan dalam gambar 3-7b harga ini sebanding dengan eksponen path loss 2,15 pada pengukuran CW pada lokasi yang sama.



(a)



(b)

Gambar 3-7⁸⁾
PENGUKURAN PATH LOSS PADA LINTASAN
RUANG BEBAS 10 UNTUK LOKASI IDENTIK DALAM LIMA PABRIK

⁸⁾ op.cit., hal. 1065

Untuk masalah multipath yang umum dimana ada N komponen multipath yang muncul, masing-masing dapat dipecahkan dan mempunyai amplitudo real ρ_i dan phase θ_i , peralatan pengukuran wide band mengolah daya yang diterima P_w sebagai jumlah dari masing-masing daya lintasan. Penerima CW mengukur daya P_{cw} sebagai kuadrat dari envelope jumlah seluruh sinyal yang datang pada antena. Untuk menentukan kapan pengukuran path loss wide band dan narrow band memberikan hasil yang sama, perlu diasumsikan bahwa lintasan diterima dari proses acak dimana masing-masing lintasan mempunyai amplitudo dan phase yang acak pula.

Jika $E_{\rho, \theta} [\cdot]$ menyatakan ensemble average pada ρ dan θ , dan koefisien korelasi amplitudo lintasan r_{ij} didefinisikan sebagai

$$r_{ij} = E_{\rho} [\rho_i \rho_j], \quad (3-3)$$

maka pengukuran daya wide-band rata-rata diberikan oleh :

$$E_{\rho, \theta} [P_w] = E_{\rho, \theta} \left[\sum_i^N |\rho_i e^{j\theta_i}|^2 \right] = \sum_i^N \overline{\rho_i^2} \quad (3-4a)$$

Dalam persamaan (14a) tanda bar menyatakan rata-rata sample pada daerah pengukuran lokal. Pengukuran daya CW rata-rata diberikan oleh :

$$\begin{aligned} E_{\rho, \theta} [P_{cw}] &= E_{\rho, \theta} \left[\left| \sum_i^N \rho_i e^{j\theta_i} \right|^2 \right] \\ &= \overline{\left(\rho_1 e^{j\theta_1} + \dots + \rho_N e^{j\theta_N} \right) \left(\rho_1 e^{-j\theta_1} + \dots + \rho_N e^{-j\theta_N} \right)} \\ &= \sum_i^N \overline{\rho_i^2} + 2 \sum_i^N \sum_{j \neq i}^N r_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) \end{aligned} \quad (3-4b)$$

dimana tanda bar menyatakan time average untuk pengukuran CW pada daerah pengukuran lokal.

Ketika $\overline{\cos(\theta_i - \theta_j)} = 0$ dan / atau $r_{ij} = 0$, pengukuran daya wideband dan CW adalah ekivalen. Ini dapat terjadi baik ketika phase lintasan identik dan terdistribusi uniform bebas (iid uniform) pada $[0, 2\pi)$ atau ketika amplitudo lintasan tidak berkorelasi. Distribusi iid uniform dari θ dimungkinkan karena komponen multipath menempuh jarak beberapa ratus panjang gelombang dan mungkin datang dengan sebarang phase. Jika untuk beberapa alasan dipercaya bahwa phase tidak bebas, pengukuran wide band dan CW masih akan tetap sama jika lintasan-lintasan mempunyai amplitudo yang tidak berkorelasi. Tetapi jika phase dari lintasan-lintasan saling bergantung satu sama lain, maka amplitudonya mungkin berkorelasi, karena mekanisme yang sama yang mempengaruhi phase lintasan mungkin juga untuk mempengaruhi amplitudo. Situasi seperti ini sangat tidak mungkin.

Dengan menggerakkan peralatan pengukuran pada jarak beberapa panjang gelombang pada masing-masing lokasi pengukuran, harga ρ_i^2 dalam persamaan (3-4) yang diharapkan dihitung dan θ_i dianggap iid uniform. Kesesuaian antara data path loss yang dikumpulkan baik dengan menggunakan sistem pengukuran CW dan wide band konsisten dengan asumsi iid uniform pada phase multipath, dan menunjukkan bahwa untuk kanal radio ruang tertutup pengukuran path loss wideband dapat diharapkan memberikan hasil yang sangat mirip dengan data yang dikumpulkan dengan menggunakan peralatan narrowband.

III.2.2 Shadowing

Naiknya harga varian dan path loss untuk lintasan terhalangi yang diberikan oleh tabel 3-2 menganjurkan bahwa shadowing yang disebabkan oleh rintangan-rintangan memainkan peran utama dalam menentukan SNR dalam lingkungan industri yang sangat kacau. Karena penggambaran yang akurat dari rintangan lintasan dijaga selama pengukuran pabrik, maka dimungkinkan untuk mengembangkan dari data rugi-rugi sinyal RF yang disebabkan oleh peralatan pabrik tertentu.

Metode ideal untuk mengukur rugi-rugi bayangan akan pertama kali menentukan daya yang diterima sepanjang sebarang lintasan LOS dan mengamati penurunan daya sinyal yang diterima. Metode alternatif untuk membentuk suatu karakteristik bayangan dari rintangan adalah mengamati level sinyal untuk rintangan-rintangan yang tetap dan membandingkannya dengan level sinyal rata-rata yang diterima sepanjang pengukuran pabrik untuk topografi tertentu. Sementara metode yang lebih dulu lebih diinginkan dalam hal anomali propagasi tidak secara langsung menunjuk pada rintangan yang sedang dikalibrasi, rintangan-rintangan di lingkungan pabrik (seperti potongan-potongan logam dalam barang-barang pabrik, mesin-mesin besar, dan sebagainya) tidak dapat dipindahkan. Konsekuensinya metode terakhir digunakan untuk menentukan efek bayangan pada peralatan pabrik secara umum.

Pengukuran-pengukuran menunjukkan bahwa beberapa bayangan (> 10 dB) terjadi ketika penerima ditempatkan beberapa meter dibelakang rintangan logam yang lebih tinggi dari antena penerima. Rintangan yang tinggi yang

diletakkan di tengah-tengah pemancar dan penerima menyebabkan rugi-rugi yang lebih kecil ($\cong 3-7$ dB). Meskipun kecenderungan ini diperkirakan dengan teori difraksi ujung-pisau, level sinyal yang diterima dalam daerah yang sangat terbayangi selalu 5 sampai 20 dB lebih besar daripada level yang diperkirakan dengan difraksi ujung-pisau, sementara level sinyal terukur untuk lintasan yang mempunyai rintangan beberapa meter baik dari pemancar dan penerima adalah 2 sampai 5 dB lebih besar daripada yang diperkirakan oleh difraksi ujung-pisau. Ini menyarankan agar sejumlah daya yang diterima yang cukup berarti datang pada sudut elevasi yang tinggi dan dari arah yang berlawanan dengan pemancar. Pengukuran wideband menunjukkan daya yang berarti diterima oleh langit-langit dan dinding pantulan. Lintasan tambahan dipercayai berasal dari pemantulan dan difraksi dari mesin-mesin tinggi yang berdekatan yang diletakkan dibelakang atau disamping penerima dan dari lorong gang.

Superposisi pada lintasan datang dapat dipercaya ketika bangunan kantor atau rumah tertentu terbuat dari bahan-bahan yang sedikit memantulkan daripada yang digunakan dalam konstruksi pabrik. Para peneliti telah melaporkan bahwa eksponen path loss berada antara 3 dan 6 dalam rumah tinggal dan gedung perkantoran dan telah ditemukan pembagian yang menyebabkan redaman sinyal pada tingkat 10 sampai 15 dB. Sebaliknya pabrik dengan eksponen rata-rata terburuk lebih kecil dari 3, mempunyai langit-langit yang luas, dinding dan barang-barang logam dan tiang penyangga logam yang siap membentuk lintasan jamak. Dalam hal ini, kanal lintasan jamak pabrik mirip dengan kanal radio

bergerak urban dimana energi kanal gedung-gedung tinggi sejajar dengan jalan, dan rintangan lokal tak terbayangi menyinari penerima melalui pantulan.

Tabel 3-3
Pengaruh Bayangan dari Peralatan Pabrik yang Umum

Obstacle Description	Attenuation (dB)
2,5 m storage rack with small metal parts (loosely packed)	4 - 6
4 m metal box storage	10 - 12
5 m storage rack with paper products (loosely packed)	2 - 4
5 m storage rack with paper products (tightly packed)	6
5 m storage rack with large metal parts (tightly packed)	20
Typical N/C machine	8 - 10
Semi-automated Assembly Line	5 - 7
0,6 m square reinforced concrete pillar	12 - 14
Stainless Steel Piping for Cook-Cool Process	15
Concrete wall	8 - 15
Concrete floor	10

Tabel 3-3 memberikan harga redaman yang umum untuk beberapa rintangan pabrik pada 1.300 MHz. Hasil-hasil ini telah dirata-rata atas tinggi antenna 1,5 dan 2 m sepanjang tengah-tengah dan tepi dari sebuah gang dan valid untuk penerima yang diletakkan secara langsung dibelakang rintangan (yaitu yang mengalami bayangan penuh). Tabel tersebut juga berisi laporan mengenai pengukuran-pengukuran dinding dan lantai yang mungkin diinginkan oleh

perancang sistem komunikasi radio pabrik. (Dalam tabel ini, kata *loosely packed* dan *heavily packed* menunjuk pada ukuran dari celah, atau bukaan, di dalam rintangan. Loosely packed menunjukkan bahwa ada beberapa bukaan yang nampak melalui rintangan dengan diameter jauh lebih besar dari satu panjang gelombang. Heavily packed diduga bahwa ada sedikit bukaan di dalam rintangan yang lebih lebar dari satu panjang gelombang.) Harga-harga dalam tabel 3-3 adalah konservatif untuk lokasi-lokasi penerima yang hanya sedikit terbayangi di dalam lingkungan yang sedikit kacau. Untuk kasus ini pemodelan difraksi ujung-pisau kelihatan cukup cocok dengan data empiris.

III.2.3 Fading Skala Kecil

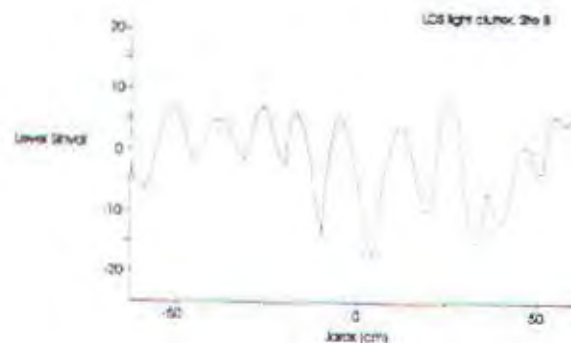
Small-scale fading (kadang-kadang disebut fast fading) meningkatkan performance dari sistem radio bergerak karena perubahan yang cepat dari level sinyal pada antena penerima yang bergerak. Data yang ada menunjukkan bahwa jangkauan dari fading dinamik yang dilihat oleh sesuatu yang bergerak atas sebuah jarak yang kecil (biasanya 1,3 m) umumnya 30 - 35 dB dan tidak berkorelasi dengan topografi pabrik, bangunan atau jarak lintasan. Gambar 3-8 menunjukkan fluktuasi sinyal yang umum atas jalur 1,3 m. Semua pengukuran skala kecil dibuat dengan gerobak penerima bergerak dengan kecepatan konstan yang beralasan antara 0,25 dan 0,3 meter/detik. Ini mungkin dicatat bahwa fade minimum lebih tajam dari fade maksimum, dan bahwa penyeberangan level median terjadi pada periode kira-kira setengah panjang gelombang. Beberapa data mempunyai penyeberangan positif melalui nol terjadi pada interval jarak sekecil

$\lambda/2$ dan sebesar $3\lambda/2$, walaupun karena ketidakpastian kecepatan kendaraan, ini tidak dapat ditentukan secara tepat.

Distribusi level sinyal sekitar median lokal disusun untuk semua lokasi pengukuran dan dibandingkan dengan distribusi Rayleigh, Rician, dan Log-Normal secara teoritis. Fungsi kerapatan probabilitas Rayleigh diberikan oleh persamaan (3-5) dan ditandai secara khusus dengan varian σ_n^2 dari lintasan jamak acak. Itu dengan baik menggambarkan situasi ketika lebih dari beberapa lintasan radio ada antara pemancar dan penerima dengan path loss yang dapat dibandingkan.

$$p_x(x) = \frac{x}{\sigma_n^2} e^{-(x^2 + t^2) / 2\sigma_n^2} \quad (3-5)$$

Ketika sebagian penting dari selubung sinyal yang diterima disebabkan oleh lintasan tertentu, seperti lintasan LOS, maka distribusi dari selubungnya adalah Rician. Fungsi kerapatan probabilitas Rician meliputi rasio K dari komponen sinyal spekuler dominan ke lintasan jamak acak, dan diberikan oleh persamaan (3-6).



Gambar 3-8
FADING YANG UMUM UNTUK PENERIMA BERGERAK DALAM PABRIK

$$p_x(x) = \frac{x}{\sigma_n^2} e^{-(x^2 + A^2)/2\sigma_n^2} I_0\left(\frac{Ax}{\sigma_n^2}\right) \quad 0 \leq x < \infty, A \geq 0$$

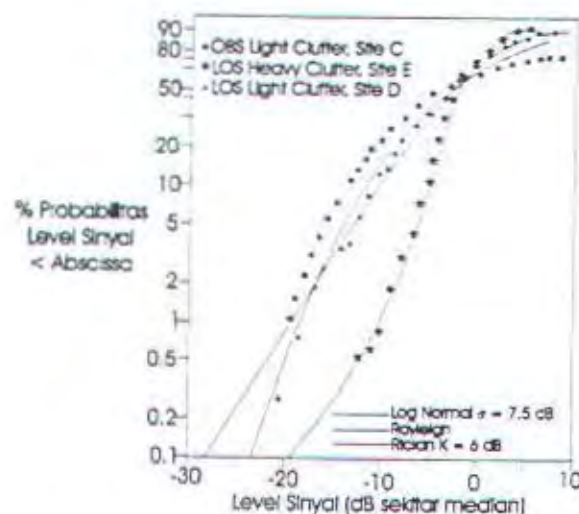
$$K = \frac{A^2}{2\sigma_n^2} \quad (3-6)$$

Dalam persamaan (3-6), $I_0(\)$ modifikasi fungsi Bessel jenis pertama orde nol. Parameter A menyatakan harga puncak dari komponen spekuler, dan mungkin diset ke satu untuk memudahkan analisa numerik sederhana dari persamaan (3-6). Distribusi log-normal secara unik digambarkan dengan rata-ratanya \bar{x} dan standard deviasi σ , dan mempunyai fungsi kerapatan probabilitas seperti pada persamaan (3-7).

$$p_x(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} e^{-(\log x - \bar{x})^2 / 2\sigma^2} \quad 0 \leq x < \infty \quad (3-7)$$

Data yang memenuhi distribusi log-normal umumnya terhadap pengamatan dalam dB disekitar nilai median. Untuk kasus ini, median dikurangkan dan pengamatan (dalam nilai dB) memenuhi distribusi normal dengan sebuah median (dan rata-rata) nol dan standard deviasi σ dB.

Meskipun ada beberapa teknik yang digunakan untuk menampilkan fungsi-fungsi distribusi dalam literatur, skala logaritmik vertikal sangat berguna karena ini dengan jelas menandai kemungkinan dari level sinyal yang sangat rendah (deep fading) yang ditandai oleh ekor kiri dari distribusi. Deep fading secara tepat adalah situasi dimana sebuah model statistik diperlukan, karena disinilah batas performance terjadi.



Gambar 3-9⁹⁾
DISTRIBUSI KUMULATIF UNTUK TIGA PENGUKURAN
DAN KECOCOKANNYA DENGAN DISTRIBUSI YANG ADA

Analisa dari distribusi fading skala kecil menandai bahwa dengan topografi pabrik tertentu, ada korelasi yang kecil antara jarak pemancar-penerima dan distribusi fading skala kecil. Tujuh belas dari dua puluh enam lokasi pengukuran LOS mengalami Rayleigh atau Rician fading dengan $K < 2$ dB. Sembilan lokasi pengukuran yang tersisa memenuhi distribusi Rician yang berbeda ($K > 2$ dB).

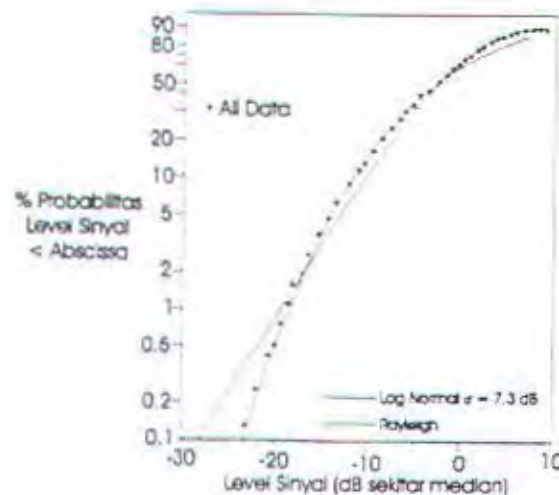
Kenyataannya, distribusi fading pemisahan skala kecil pada dua dari tiga lokasi sepanjang dinding pada site C memenuhi distribusi Rician dengan harga K 6 dB. Distribusi ini berbeda dengan log-normal dengan harga $5 \text{ dB} \leq \sigma \leq 8 \text{ dB}$ pada tiga dari delapan lokasi pengukuran OBS yang sedikit kacau, dan sembilan dari enam belas pengukuran OBS yang sangat kacau. Gambar 3-9 menunjukkan

⁹⁾ T.S. Rappaport, Loc. cit, hal 45

CDF dari tiga pengukuran yang menggambarkan kecocokan yang umum dari data ke distribusi.

Untuk menentukan model fading skala kecil secara keseluruhan yang cocok, distribusi kumulatif dari semua pengukuran yang dilakukan (di sekitar median lokalnya) digabungkan. Distribusi log-normal memenuhi data yang tergabung cukup baik untuk level sinyal di bawah median, khususnya pada ekor dimana SNR kecil. Distribusi kumulatif untuk fading skala kecil atas seluruh kelompok data ditunjukkan pada gambar 3-10, dan dapat dilihat menjadi Rayleigh terutama di atas median.

Walaupun tidak ada pemeriksaan independensi data atau tes kepercayaan yang telah dilakukan untuk menemukan kecocokan distribusi yang terbaik untuk data, ini patut dicatat bahwa kurva pada gambar 3-10 menyatakan lebih dari 20.000 pengukuran yang dibuat dalam bermacam-macam pabrik dan topografi.

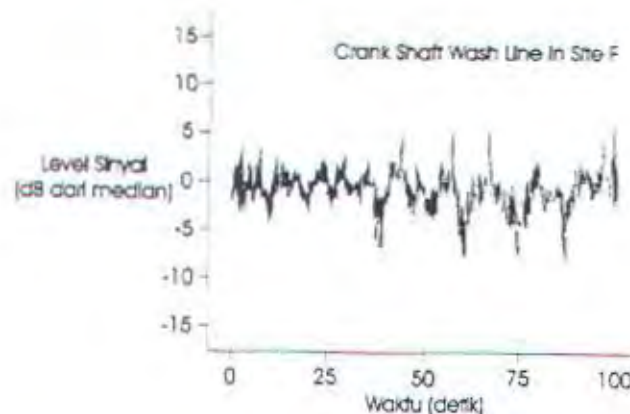


Gambar 3-10⁽¹⁾
DISTRIBUSI KUMULATIF DARI PENGUKURAN FADING SKALA KECIL
UNTUK SEMUA PABRIK DAN TOPOGRAFI

⁽¹⁾ ibid, hal. 46

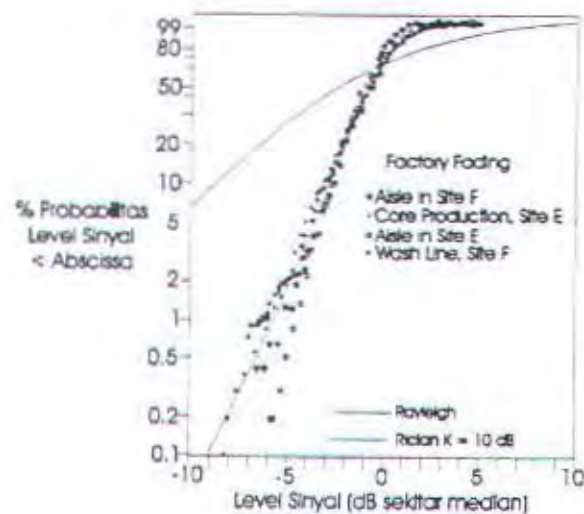
III.2.4 Fading Sesaat

Kita membuat beberapa pengukuran fading sesaat pada waktu dan lokasi yang mempunyai level gerakan yang tinggi. Gambar 3-11 menunjukkan pengukuran fading tertentu yang dibuat melintasi garis perakitan mesin. Beberapa pekerja bergerak di sekitar daerah yang kecil seperti mereka mengambil bagian logam dari *conveyor belt*, menyiraminya, dan meletakkannya kembali pada *conveyor*. Sebuah kipas yang ditempatkan pada langit-langit beroperasi secara langsung pada jarak 4 m di atas daerah tersebut, dan truk pengangkut barang berulang-ulang ke sebuah rak penyimpanan di dekatnya. Rak penyimpanan yang besar dan sebuah *suspended cat walk* yang berisi cadangan daya yang sangat besar diletakkan 20 m di belakang penerima. Data fading ditunjukkan pada gambar 3-11 memenuhi tes yang dilakukan secara bebas pada $\alpha = 0,08$. Beberapa pengukuran fading dilakukan melintasi garis pertemuan dan di dalam gang utama. Gambar 3-12 menunjukkan kecocokan yang baik dengan mana data fading sesaat sesuai dengan distribusi Rician dengan harga $K = 10$ dB.



Gambar 3-11¹¹⁾
PENGUKURAN FADING SESAAT (SITE F), JARAK Tx-Rx 25 m

¹¹⁾ ibid, hal. 46



Gambar 3-12¹²⁾
DISTRIBUSI LEVEL SINYAL KUMULATIF
UNTUK FADING SESAAT

Menarik untuk dicatat bahwa pengukuran-pengukuran fading sesaat yang ada saat ini menandakan bahwa fading Rician terjadi dalam lingkungan gedung perkantoran secara baik. Statistik fading sesaat digandengakan atas lintasan terhalangi di dalam dua tipe struktur bangunan yang berbeda ditunjukkan memenuhi distribusi Rician dengan harga K yang berbeda.

Jangkauan dinamik dari seluruh data fading sesaat pabrik lebih kecil dari 20 dB. Ini 10 dB lebih rendah daripada jangkauan yang dilaporkan oleh Bultitude dalam sebuah gedung perkantoran yang mempunyai pembagian interior dengan blok keramik, tetapi pada tingkat jangkauan fading yang teramati dalam sebuah bangunan dengan ukuran serupa yang mempunyai tampilan terbuka dan pembagian yang dapat dipindahkan. Satu penjelasan dan model fisik yang masuk akal untuk pengamatan seperti itu adalah bahwa dalam gedung kantor, mungkin

¹²⁾ ibid, hal. 47

hanya ada satu atau dua lintasan utama dimana propagasi terjadi. (Kata lintasan di sini tidak menyebut lintasan yang nyata, tetapi hanya sebuah saluran atau bimbingan yang dibentuk oleh struktur fisik dari bangunan dan yang mungkin mengandung beberapa lintasan jamak, yang di sini disebut sebagai lintasan suplemen. Sebagai contoh dari lintasan utama adalah lorong yang menghubungkan dua bangunan dalam sebuah gedung perkantoran.) Karena obyek-obyek dalam kanal bergerak, mereka mungkin menghalangi lintasan utama dan memodulasi beberapa lintasan suplemen. Untuk lintasan yang terhalangi dalam gedung-gedung yang terbagi dengan baik, seseorang mungkin berharap hanya satu atau dua dari lintasan utama yang ada.

Tetapi dalam suatu pabrik, pemecahan adalah jarang / langka dan beberapa lintasan utama lebih suka muncul antara pemancar dan penerima oleh karena kandungan logam yang besar dan pengembangan terbuka untuk seluruh areal. Lintasan-lintasan utama terutama diciptakan oleh penerangan dari penghambur tetap yang besar yang ditempatkan di samping, di atas, dan di belakang penerima. Karena gerakan dalam pabrik dilokalisasi, dibatasi sampai lorong-lorong dan areal produksi, tetapi tidak sampai pada rak-rak penyimpanan, tiang-tiang penyangga, atau mesin-mesin besar, sejumlah besar lintasan utama stasioner sesaat muncul. Jadi, kekacauan kanal karena gerakan menghasilkan variasi kuat lintasan suplemen dengan hanya satu atau dua lintasan utama, tetapi tidak dalam beberapa daerah yang lain. Untuk kasus ini, distribusi Rician diperkirakan, mempunyai rasio K dependen atas penjumlahan kuat lintasan stasioner dan varian dari kuat lintasan berubah waktu. Komponen suplemen yang membuat lintasan berubah

waktu adalah mendekati sama kuat (karena mereka berayun bolak-balik dalam waktu, bergerak sepanjang topografi yang sama, dan mengenai pembaur yang sama) dan fase acak sehingga dari Gaussian proses. Situasinya berhubungan dengan noise Gaussian narrowband yang ditambahkan pada komponen pembawa RF yang tetap, yang memberikan kenaikan pada distribusi selubung Rician. Dalam bentuk kelakuan fading sesaat, bangunan kantor dengan perencanaan terbuka dan pabrik akan kelihatan sama.

III.2.5 RMS Delay Spread (σ) dan Mean Excess Delay ($\bar{\tau}$) di dalam Pabrik

Dengan menggunakan profil delay daya rata-rata dari tiap-tiap 50 lokasi pengukuran dalam lima pabrik, rms delay spread (σ) dan mean excess delay ($\bar{\tau}$) ditabelkan sebagai fungsi dari bangunan dan topografi. Tabel 3-4 dan 3-5 memberikan harga σ untuk jarak pemancar-penerima lebih kecil dari 25 m dan melampaui 40 m. Dapat dilihat dari tabel bahwa harga delay spread tidak berkorelasi dengan jarak pemancar-penerima atau topografi.

TABEL 3-4
RMS DELAY SPREAD SEBAGAI FUNGSI TOPOGRAFI PABRIK UNTUK
JARAK Tx-Rx 10-25 m

Topografi	Site B	Site C	Site D	Site E	Site F
LOS light clutter	87,6	118,8	51,1	-	-
LOS heavy clutter	45,6	46,9	106,7	48,7	124,3
LOS along wall	-	122,4	-	-	-
Obstructed light clutter	27,7	102,6	103,2	-	-
Obstructed heavy clutter	70,9	101,5	101,5	79,3	49,6

TABEL 3-5
RMS DELAY SPREAD SEBAGAI FUNGSI TOPOGRAFI PABRIK UNTUK
JARAK Tx-Rx 40-75 m

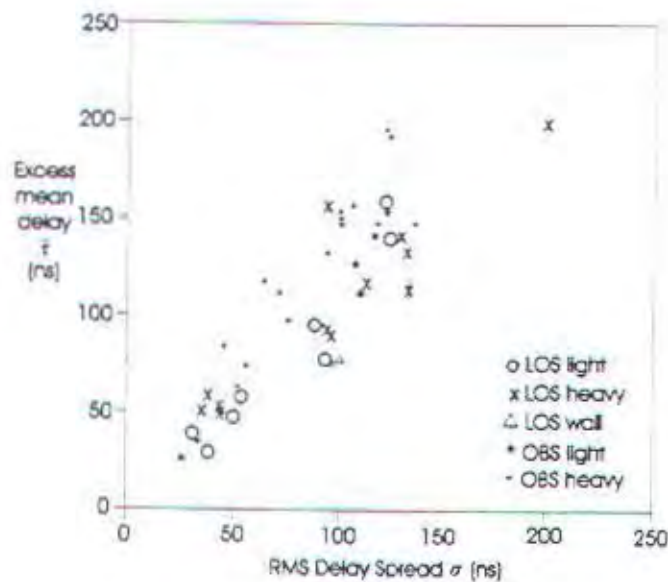
Topografi	Site B	Site C	Site D	Site E	Site F
LOS light clutter	33,9	43,2	118,5	-	-
LOS heavy clutter	39,5	201,5	33,3	93,6	44,3
LOS along wall	-	92,7	-	-	-
Obstructed light clutter	-	118,5	108,9	-	-
Obstructed heavy clutter	77,2	114,7	106,8	52,5	129,6

Nilai σ mungkin sering dihubungkan dengan $\bar{\tau}$. Sebuah profil delay daya multipath yang menurun secara eksponensial terhadap delay sesuai dengan situasi dimana $\sigma = \bar{\tau}$. Situasi ini juga sesuai untuk respon impuls dua lintasan dengan lintasan ke dua tiba pada selang waktu $2\bar{\tau}$. Untuk kasus dimana $\bar{\tau} < \sigma$ profil daya multipath mempunyai konsentrasi daya yang tinggi pada harga excess delay yang kecil dan distribusi daya yang jauh lebih kecil pada delay yang lebih besar. Tetapi ketika $\bar{\tau} > \sigma$, sejumlah daya yang cukup berarti tiba di tengah profil dan tidak pada kompoen multipath paling awal. Scatter plot menunjukkan hubungan antara $\bar{\tau}$ versus σ untuk bermacam-macam topografi pabrik seperti ditunjukkan pada gambar 3-13. Dalam gambar ini titik-titik data telah didapatkan dari profil daya rata-rata secara acak dari tiap-tiap 50 lokasi pengukuran. Pengukuran LOS sepanjang *fire wall* dalam site C memenuhi slope $\bar{\tau}/\sigma = 0,83$ dengan sangat baik. Daerah LOS light dan heavy clutter ditemukan memenuhi garis dengan slope $\bar{\tau}/\sigma$

sedangkan lintasan obstructed heavy clutter mempunyai $\bar{\tau}/\sigma = 1,57$. Data secara lebih jauh menunjukkan bahwa lintasan obstructed cenderung mempunyai mayoritas daya yang diterima pada delay yang lebih panjang, sedangkan lintasan LOS menerima sebagian besar sinyal yang datang lebih awal pada profil delay multipath.

Kanal selektif frekuensi dikarakterisasi dalam suku-suku ekspansi deret Taylor dari spektrum daya multipath rata-rata di sekitar frekuensi pusat. Untuk kanal wide sense stationary uncorrelated scattering (WSSUS), rms delay spread pada persamaan (3-17) menggambarkan rasio daya dalam suku selektif frekuensi pertama (linier) dari ekspansi deret terhadap daya dalam komponen flat fading. Untuk mempelajari kanal multipath pabrik, nilai rms delay spread telah diolah untuk masing-masing profile delay daya untuk memberikan sebuah ukuran dari excess time delay yang padanya konsentrasi daya multipath dikonsentrasikan. Karakterisasi pengukuran respon impulse dengan cara ini memberikan dasar untuk perbandingan karakteristik dalam kanal yang berbeda.

Fungsi distribusi kumulatif (CDF) dari σ untuk bermacam-macam pabrik dan topografi telah diolah. Untuk menyederhanakan analisa data, data delay spread untuk lintasan LOS dalam topografi light dan heavy cluttered dikelompokkan sebagai lintasan LOS. Demikian pula data dari topografi light dan heavily obstructed clutter dikelompokkan sebagai lintasan terhalangi (OBS). Grafik yang menunjukkan CDF dari σ untuk semua lintasan LOS sebagai fungsi dari pabrik diberikan pada gambar 3-14. Grafik yang menunjukkan CDF dari σ



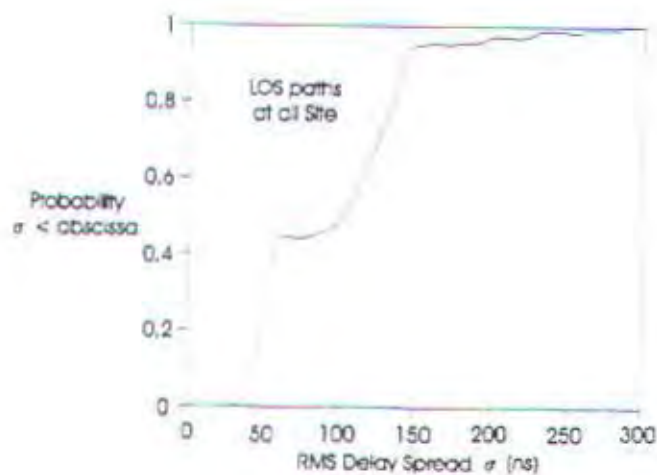
Gambar 3-13¹³⁾
 SCATTER PLOT DARI EXCESS MEAN DELAY
 TERHADAP RMS DELAY SPREAD SEBAGAI FUNGSI
 TOPOGRAFI PABRIK

untuk semua lintasan OBS sebagai fungsi dari pabrik diberikan pada gambar 3-15. Gambar 3-16 menunjukkan CDF dari σ atas seluruh kumpulan data pengukuran wide band. CDF dalam gambar 3-14 sampai 3-16 diturunkan dengan menggunakan nilai σ yang diolah dari masing-masing profil delay daya multipath (bukan rata-rata lokal) dan kenaikan absis 1 ns.

Menarik untuk mencatat efek dari barang-barang perlengkapan pabrik dan umur terhadap σ . Site B mengandung lebih sedikit barang-barang logam dan lebih banyak barang-barang kertas daripada pabrik lainnya. Bangunan ini juga berbeda dalam bahwa ia tidak mengikuti layout bangunan terbuka yang umum pada bangunan yang lain karena dinding-dinding beton digunakan untuk memisahkan beberapa daerah pabrik. Pengukuran lintasan terhalangi pada site B dilakukan

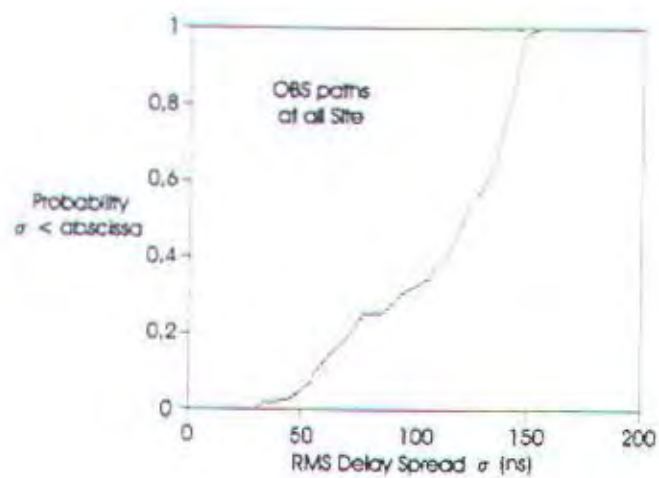
¹³⁾ T. S. Rappaport, Loc.cit, hal. 1066

dalam gudang utama yang besar (100 m x 60 m) dan gudang yang lebih kecil (80 m x 50 m), dan mempunyai median dan nilai rms delay spread terburuk berturut-turut 56 dan 129 ns. Pengukuran LOS dibuat dalam gudang utama dan daerah penghasil makanan dingin, dan mempunyai nilai median dan σ 49 dan 131 ns. CDF untuk pengukuran delay spread pada site B ditunjukkan pada gambar 3-17a dan 3-17b. Melihat keseluruhan data pada gambar 3-16, nilai-nilai ini secara konsisten adalah separoh dari yang ditemukan dari seluruh pabrik. Penurunan delay spread dipercaya disebabkan terutama oleh barang-barang non konduktor. Dasar pikiran ini didukung oleh hasil-hasil rms delay spread untuk lintasan LOS pada site D yang dibuat dalam daerah pengepakan dari sebuah bentuk bangunan terbuka dari pabrik.

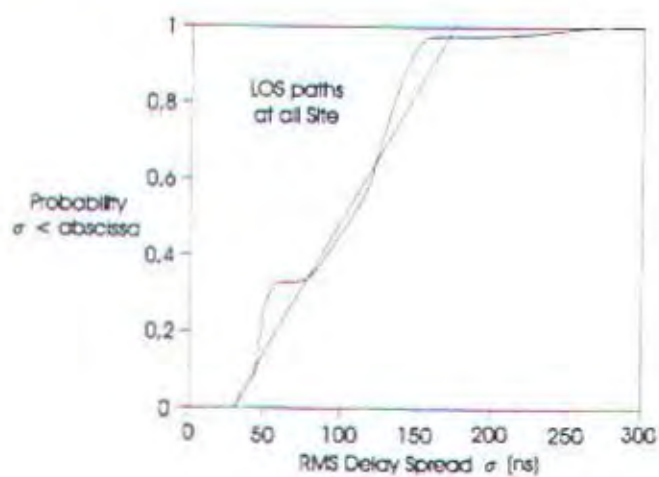


Gambar 3-14¹⁴⁾
DISTRIBUSI KUMULATIF DARI σ UNTUK SEMUA LINTASAN LOS

¹⁴⁾ ibid, hal. 1066



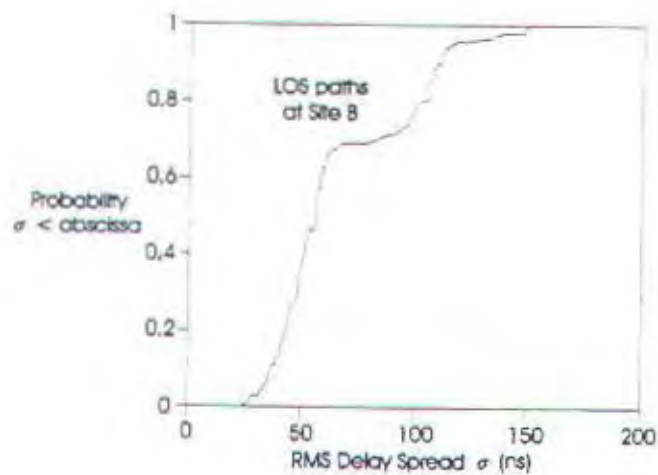
Gambar 3-15¹⁵⁾
DISTRIBUSI KUMULATIF DARI σ UNTUK SEMUA LINTASAN OBS



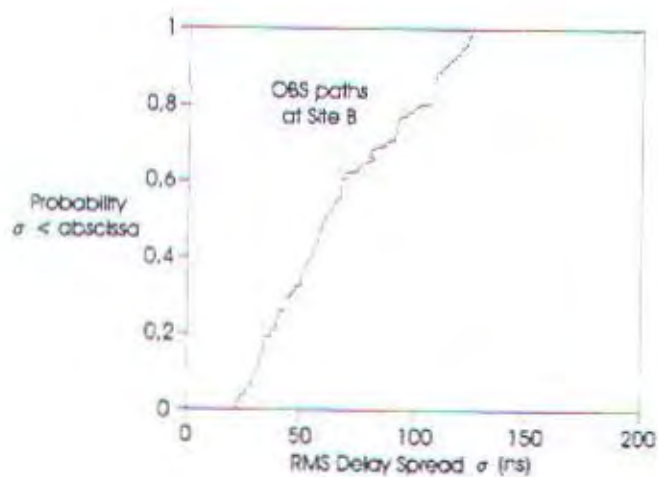
Gambar 3-16¹⁶⁾
RMS DELAY SPREAD σ (ns)

¹⁵⁾ ibid, hal. 1066

¹⁶⁾ ibid, hal. 1066



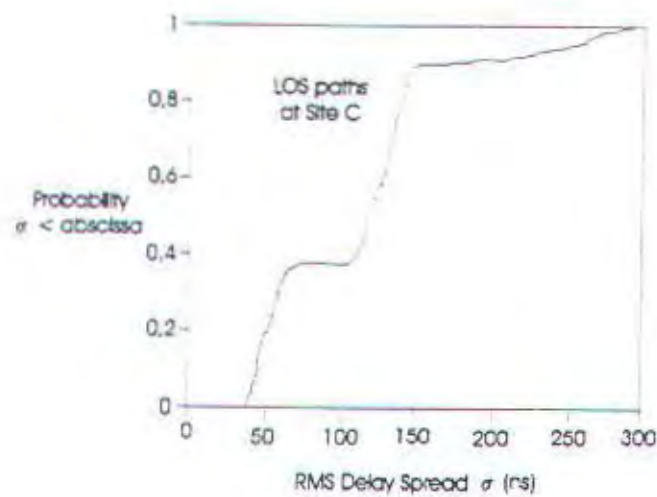
(a)



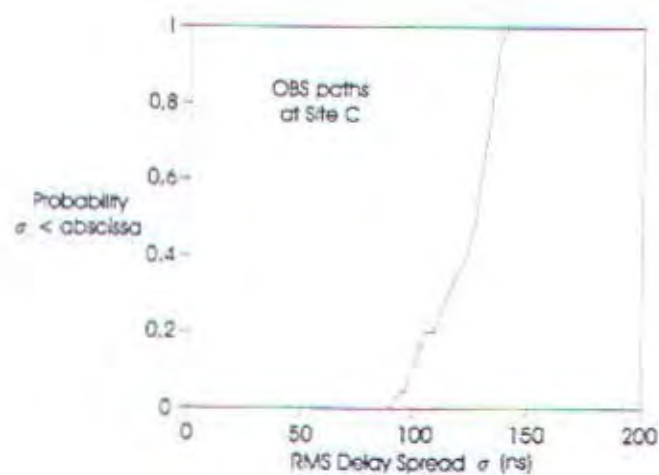
(b)

Gambar 3-17 (a-f)¹⁷⁾
 DISTRIBUSI KUMULATIF DARI σ
 UNTUK TOPOGRAFI LINTASAN LOS DAN OBS DALAM
 BERMACAM-MACAM BANGUNAN

¹⁷⁾ ibid, hal. 1067

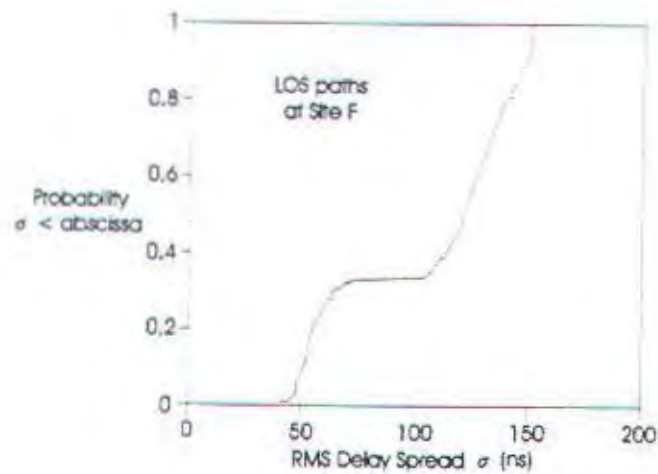


(c)

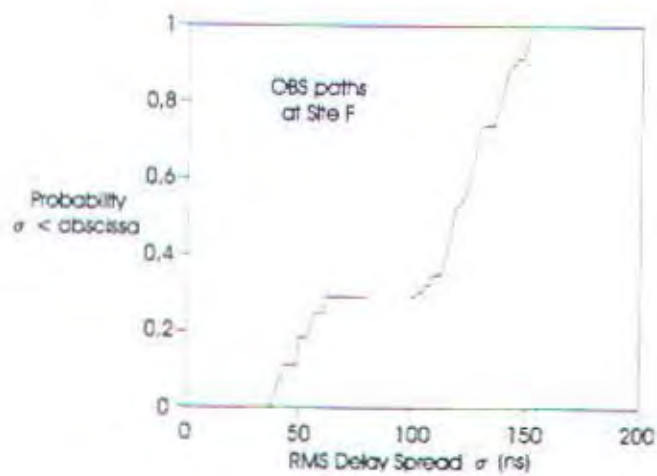


(d)

Gambar 3-17 (a-f)
DISTRIBUSI KUMULATIF DARI σ
UNTUK TOPOGRAFI LINTASAN LOS DAN OBS DALAM
BERMACAM-MACAM BANGUNAN



(e)



(f)

Gambar 3-17 (a-f)
DISTRIBUSI KUMULATIF DARI σ
UNTUK TOPOGRAFI LINTASAN LOS DAN OBS DALAM
BERMACAM-MACAM BANGUNAN

Distribusi dari σ juga menggambarkan efek dari umur bangunan terhadap propagasi multipath. Site C dan F, yang keduanya membuat produk mesin, adalah pabrik termodern yang dikunjungi. Struktur bangunan menggunakan lebih banyak logam daripada bangunan yang lain. Sebagai contoh dari konstruksi modern, kedua pabrik mempunyai dinding luar yang menggunakan insulated steel, sedangkan pada site lain dinding luarnya terbuat dari beton bertulang, batu kali atau bahkan kayu. CDF untuk pengukuran σ pada site ini ditunjukkan pada gambar 3-17c sampai 3-17f. Nilai median dan rms delay spread dalam site C dan F pada lintasan LOS (120 ns dan 123 ns) dan dalam lintasan terhalangi (119 ns dan 126 ns) adalah nilai terbesar yang teramati. Tetapi nilai delay spread terburuk melampaui 140 ns dalam semua topografi dalam keempat pabrik, dengan maksimum nilai terburuk mencapai 300 ns pada site C. Menarik untuk dicatat bahwa perbedaan antara nilai delay spread rms terburuk dalam topografi LOS dan OBS adalah lebih kecil dari 10 ns pada semua site kecuali site C. Ini jelas menunjukkan beberapa propagasi multipath (σ besar) terjadi baik lintasan LOS ada atau tidak antara pemancar dan penerima.

Lintasan LOS dalam semua bangunan menunjukkan daerah flat yang berbeda pada plot CDF. Data lintasan terhalangi dari semua site kecuali site F, dimana hanya enam lokasi pengukuran yang digunakan, memiliki distribusi σ yang lebih halus. Penemuan seperti ini menandakan bahwa propagasi multipath sepanjang lorong LOS dalam pabrik disebabkan terutama oleh pantulan acak yang berbeda-beda dari obyek-obyek atau dinding-dinding pada ujung gang, dan

pantulan langit-langit sepanjang gang. Bentuk diskrit alami dari pantulan dinding dalam topografi LOS juga ditunjukkan pada gambar 3-2 dan 3-4.

Konsistensi daerah flat antara 50 dan 80 ns dalam CDF σ untuk lintasan LOS berhubungan dengan lokasi pengukuran yang dipilih dalam tiap-tiap pabrik dan jalannya waktu sweep oscilloscope. Berbagai usaha dibuat untuk memastikan bahwa semua pengukuran dilakukan pada topografi yang umum dan dapat dibandingkan dalam semua site. Efek yang muncul karena pantulan dinding dijaga tetap dengan menempatkan pemancar dan penerima sebisa mungkin di pusat dari tiap-tiap lokasi pengukuran. Distribusi diskrit dari nilai σ untuk lintasan LOS secara jelas menandakan bahwa perhatian geometris seperti penempatan pemancar dan penerima relatif terhadap dinding memainkan peranan kunci dalam menentukan bentuk dan pengembangan profile delay multipath dalam pabrik. Distribusi σ yang lebih kontinyu dan mendekati uniform untuk lintasan terhalangi mungkin dapat dijelaskan dengan mencatat bahwa propagasi tidak seluruhnya dibatasi pada gang. Sinyal-sinyal datang dengan beberapa lintasan yang mungkin mengandung difraksi dari benda-benda sekitar dan pantulan dari langit-langit dan obyek-obyek besar yang ada di gang-gang yang berdekatan. Data yang ada menyarankan penggunaan model propagasi hibrid yang menggabungkan pelacakan gelombang untuk pemantulan acak yang disebabkan oleh dinding luar dan karakterisasi statistik multipath yang dikondisikan dalam layout bangunan dan barang-barang.

Seluruh data yang dikumpulkan mengindikasikan bahwa untuk kanal pabrik rata-rata, rms delay spread sedikit lebih besar dari 100 ns, dan mempunyai

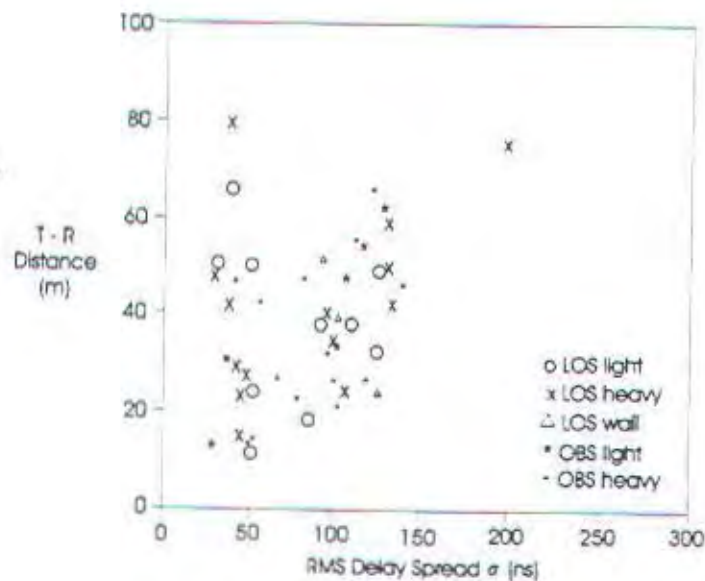
distribusi yang mendekati uniform antara 30 sampai 170 ns seperti ditunjukkan pada gambar 3-16. Nilai terburuk rms delay spread tidak melampaui 300 ns untuk pabrik bentuk terbuka modern. Kenyataan bahwa distribusi σ secara serupa terbentuk atas beberapa struktur bangunan dan industri menyarankan bahwa pengukuran adalah indikasi umum dari nilai rms delay spread yang tidak dijumpai dalam pabrik lain. Lebih jauh lagi seseorang akan secara intuitif akan mengira barang-barang bukan logam akan meredam sinyal dan mengurangi multipath di site B, dan akan mengira bahwa barang-barang logam dan dinding-dinding akan menginduksikan median multipath spread yang lebih besar pada site C dan F. Distribusi σ pada gambar 3-17 secara jelas mendukung intuisi ini.

Plot dari scatter dengan menggunakan nilai σ yang didapat dari profile delay daya rata-rata acak lokal dibuat untuk memastikan korelasi rms delay spread pada path loss atau jarak pemancar-penerima. Gambar 3-18 dan 3-19 menunjukkan diagram scatter dari rms delay spread yang diplot terhadap jarak pemancar-penerima dan path loss, sebagai fungsi dari topografi pabrik. Nilai path loss mengacu pada lintasan ruang bebas 10λ .

Gambar 3-18 menunjukkan bahwa σ tidak berkorelasi dengan jarak pemancar-penerima untuk semua topografi. Gambar tersebut juga menunjukkan distribusi uniform dari σ pada lintasan heavy cluttered obstructed sedangkan pada lintasan LOS (dan light cluttered obstructed) terlihat mempunyai distribusi *distinctive bimodal* pada 45 dan 105 ns.

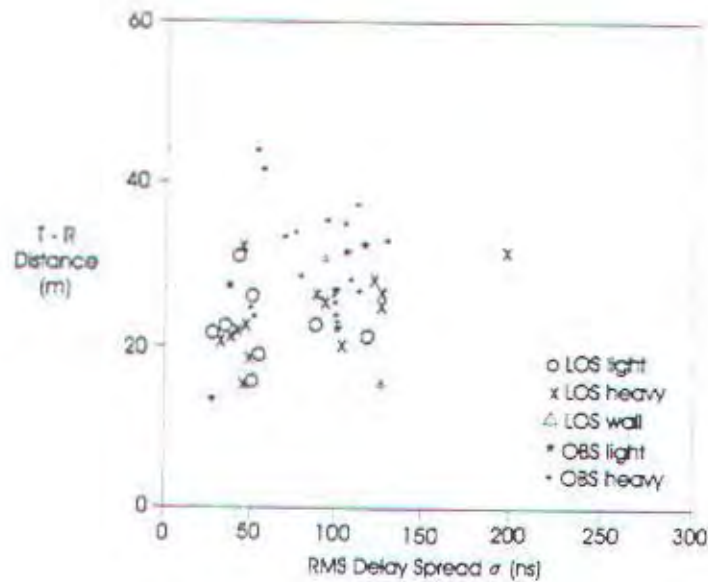
Gambar 3-19 menunjukkan bahwa σ juga tidak berkorelasi dengan path loss pada semua topografi. Penemuan ini mirip dengan apa yang pernah diamati

oleh Turin dalam kanal radio mobil di daerah urban dan juga mirip dengan yang didapatkan oleh Saleh dan Valenzuela dalam gedung perkantoran ukuran medium. Data menyarankan bahwa di dalam pabrik, nilai σ rata-rata tidak tergantung pada topografi, tetapi tergantung pada usia bangunan dan barang-barang dalam pabrik.



Gambar 3-18⁽¹⁸⁾
SCATTER PLOT DARI σ
TERHADAP JARAK PEMANCAR-PENERIMA
SEBAGAI FUNGSI DARI TOPOGRAFI PABRIK

¹⁸⁾ ibid, hal. 1068

Gambar 3-19⁽¹⁹⁾

SCATTER PLOT DARI σ
TERHADAP PATH LOSS PADA TRANSMISI RUANG BEBAS 10 λ
SEBAGAI FUNGSI DARI TOPOGRAFI PABRIK

III.3 Model Kanal dan Parameter Penting

III.3.1 Model Kanal

Jika $x(t)$ menyatakan bentuk gelombang yang dipancarkan dan $y(t)$ bentuk gelombang yang diterima, sebuah kanal lintasan jamak pabrik mungkin dikarakterisasi oleh respon impulse $h(t)$. Sinyal yang diterima $y(t)$ bentuk teredam dan tertunda dari sinyal yang dipancarkan $x(t)$. Untuk model kanal diskrit, ini berarti

$$y(t) = \sum_k \alpha_k(t) x(t - \tau_k(t)) \quad (3-8)$$

⁽¹⁹⁾ ibid. hal. 1068

Sinyal yang diterima dalam persamaan (3-8) adalah fungsi waktu dan delay (τ_k). Karena pengukuran dibuat selama aktivitas pabrik yang lambat, α_k dan τ_k yang dikenai oleh kanal pada hakekatnya tidak tergantung oleh waktu. Dengan kenyataan ini, respon impulse diberikan oleh

$$h(t) = \sum_k \alpha_k \delta(t - \tau_k) \quad (3-9)$$

dimana $\delta(\cdot)$ fungsi impulse satuan dan τ_0 menyatakan kedatangan pulsa pertama yang dapat diamati.

Untuk bentuk sinyal yang dipancarkan

$$x(t) = \text{Re}[p(t)e^{j2\pi f_c t}] \text{ dimana}$$

$$p(t) \equiv \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq 10^{-8} \text{ s} \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases} \quad (3-10)$$

output kanal adalah

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\zeta) h(t - \zeta) d\zeta = \text{Re}[r(t)e^{j2\pi f_c t}] \quad (3-11)$$

dimana

$$r(t) = \sum_k \alpha_k e^{-j2\pi f_c \tau_k} p(t - \tau_k)$$

Kanal dapat digambarkan secara ekivalen oleh respon impulse baseband $h_b(t)$ yang mempunyai sebuah output $r(t)$ yang merupakan envelope kompleks dari $y(t)$. Karakterisasi low-pass menggantikan variasi frekuensi tinggi membuatnya mudah ditangani secara analitik. Jadi cukup mengkarakterisasi respon impulse kanal ekivalen low-pass $h_b(t)$ yang dinyatakan oleh

$$h_b(t) = \sum_k \alpha_k e^{-j2\pi f_c \tau_k} \delta(t - \tau_k) \quad (3-12)$$

Dalam persamaan (3-12), α_k adalah faktor redaman real, $e^{-j2\pi f_c \tau_k}$ menyatakan pergeseran fase linier karena propagasi, dan τ_k adalah waktu tunda dari lintasan ke- k dari kanal.

Dengan memodulasi gelombang pembawa RF dengan probe 10 ns, output dari kanal low-pass hampir mendekati respon impulse $h_b(t)$. Sebagai ganti mengukur $r(t)$, $|r(t)|^2$ lebih mudah diukur. Misalkan θ_k menyatakan suku fase linier dalam persamaan (3-12), multipath power profile display menjadi

$$|r(t)|^2 = r(t)r^*(t) = \text{Re} \left[\sum_j \sum_k \alpha_j \alpha_k^* p(t - \tau_j) p^*(t - \tau_k) e^{-j(\theta_j - \theta_k)} \right] \quad (3-13)$$

Jika harga $|\tau_j - \tau_k| > 10$ ns untuk semua $j \neq k$, maka

$$|r(t)|^2 = \left[\sum_k \alpha_k^2 p^2(t - \tau_k) \right]$$

dan pengukuran power profile mempunyai resolusi lintasan 10 ns. Untuk $|\tau_j - \tau_k| < 10$ ns, ada pulsa yang tumpang tindih, dan ini diasumsikan ada sub lintasan yang tidak dapat diselesaikan yang berkombinasi untuk membentuk satu lintasan yang dapat diamati. Durasi rms dari probe adalah 7,8 ns dan nilai ini secara alternatif dipakai untuk menentukan resolusi waktu tunda. Meskipun digital oscilloscope menyediakan harga (α_k^2, τ_k) pada interval antara 1 sampai 7,8 ns tergantung dari sweep rate, power profile dikuantisasi kedalam bin yang mempunyai durasi 7,8 ns (untuk perhitungan parameter multipath seperti delay spread, semua harga (α_k^2, τ_k) digunakan). Dalam tiap-tiap bin, harga α_k^2 dirata-rata untuk mendapatkan harga ekivalen A_k^2 pada waktu tunda T_k . Jadi meskipun pengukuran dinyatakan

oleh persamaan (3-13), data telah dikurangi untuk menyatakan tiap-tiap power profile sebagai berikut :

$$|r(t)|^2 \equiv |h_s(t)|^2 = \sum_k A_k^2 p^2(t - T_k), \quad T_{K+1} - T_K = 7.8 \text{ ns} \quad (3-14)$$

Karena power impulse respon yang direkam pada interval $\lambda/4$ pada lintasan sepanjang 1 m, lokal fading (fading skala kecil) dari masing-masing komponen multipath diamati. Jadi tiap-tiap pengukuran tidak hanya fungsi dari waktu tunda tetapi juga jarak. Untuk posisi x_0 pada sebuah lintasan tertentu, power impulse respon dapat dinyatakan dengan

$$|r(t; x_0)|^2 \equiv |h_s(t; x_0)|^2 = \sum_{x=x_0} \sum_k A_k^2(X) p^2(t - T_k(X)) \quad (3-15)$$

Jadi fluktuasi dari kuat sinyal dan delay multipath mungkin dikarakterisasi secara statistik atas sebuah daerah lokal. Untuk 5λ sampai 10λ disekitarnya, kanal radio portabel dan bergerak bersifat wide sense stationary (WSS).

III.3.2 Parameter Kanal Multipath

Kanal multipath wideband dikuantisasi secara kasar oleh mean excess delay ($\bar{\tau}$) dan rms delay spread (σ). Pembentuknya adalah momen pertama dari power delay profile dan didefinisikan sebagai

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k \alpha_k^2 \tau_k}{Gr} \quad \text{dimana } Gr = \sum_k \alpha_k^2 \quad (3-16)$$

Berikutnya adalah akar kuadrat dari momen sentral kedua dari profile dan didefinisikan sebagai

$$\sigma = \sqrt{\overline{r^2} - (\bar{r})^2}, \quad \text{dimana } \bar{r^2} = \frac{\sum \alpha_i^2 r_i^2}{G_r}, \quad (3-17)$$

Dalam persamaan (3-17), delay dari tiap-tiap profile diukur relatif terhadap sinyal datang pertama yang terdeteksi pada $r_0 = 0$. Suku G_r dalam persamaan (3-16) dan (3-17) adalah ukuran relatif dari daya yang diterima untuk profile pengukuran yang telah ditentukan. Dengan G_r adalah daya yang diterima pada jarak pemancar-penerima 10λ pada ruang bebas dan memasukkan faktor yang membuat waktu sampling pengukuran dan referensi berbeda, pathloss dari kanal dapat dihitung. Jika PL adalah pathloss relatif pada lintasan ruang bebas 10λ , P_t adalah daya rata-rata pemancar, A_t adalah seting redaman pemancar untuk pengukuran tertentu dan $A_{10\lambda}$ menyatakan seting redaman referensi, maka PL dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$PL(dB) = P_t(dBm) - P_{10\lambda}(dBm) - A_t(dB) + A_{10\lambda}(dB) + 10 \log_{10} \left[\frac{G_{10\lambda} \Delta \tau_{10\lambda}}{G_r \Delta \tau_r} \right] \quad (3-18)$$

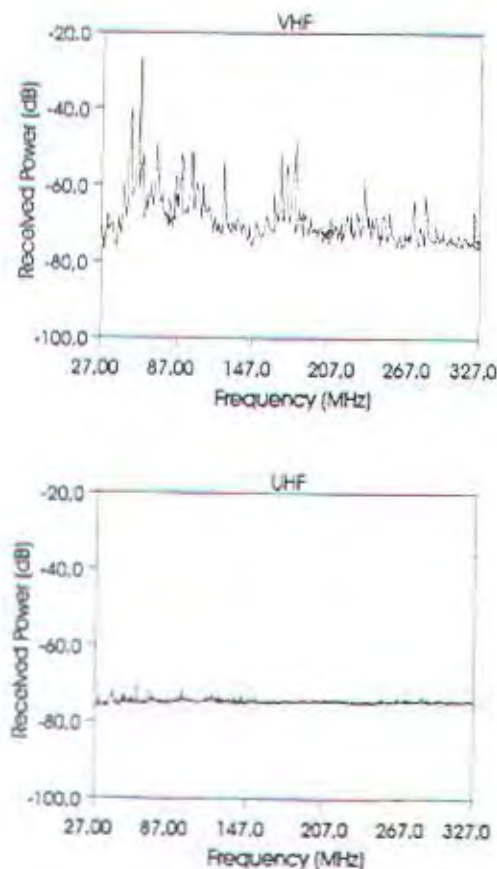
dimana P_t adalah 14,0 dBm, $\Delta \tau_{10\lambda}$ adalah interval sampling untuk pengukuran referensi 10λ (sama dengan 0,39 ns), dan $\Delta \tau_r$ adalah interval sampling untuk pengukuran profile (baik 1,56 ; 3,91 ; atau 7,82 ns).

III.4. Noise Dan Interferensi

III.4.1. Noise Pabrik

Walaupun banyak noise radio yang dijumpai di pabrik muncul dari sumber-sumber emisi secara lemah, pengukuran telah menunjukkan bahwa beberapa tipe dari peralatan industri menghasilkan energi RF harmonik dan dapat

meradiasikan noise tambahan (sampai beberapa ratus MHz). Peralatan-peralatan pabrik seperti *RF-stabilized arc welders*, *induction heaters*, dan *plastic bonders* merupakan sumber noise akut. Meskipun interferensi adalah penting pada HF dan VHF, grafik noise dari peralatan-peralatan tersebut turun secara cepat di atas 1 GHz (gambar 3-20). Kecenderungan ini juga ditemukan pada kanal radio bergerak di daerah urban.



Gambar 3-20²⁰⁾
PENGUKURAN SPEKTRUM DAYA NOISE PUNCAK

²⁰⁾ T. S. Rappaport, "Indoor Radio Communications for Factories of the Future", IEEE Communications Magazine, Mei 1989

Pengukuran baru-baru ini mengkonfirmasi bahwa mesin-mesin tertentu yang membangkitkan level noise dalam pabrik yang beroperasi adalah jauh lebih sedikit pada frekuensi yang lebih tinggi. Gambar 3-20 menunjukkan hasil pengukuran daya noise puncak (diukur 4m dari garis tengah silinder mesin) dibuat sepanjang sebuah mesin bekerja pada operasi penuh. Jika dibandingkan dengan spektrum VHF, level noise terendah adalah 40 dB lebih rendah pada frekuensi UHF / gelombang mikro dan hanya beberapa dB di atas garis dasar noise termal dari penerima spectrum analyzer.

Walaupun studi yang sempurna tentang noise impuls belum diadakan, hasil ini sedang mendorong dan mengindikasikan bahwa noise yang dibangkitkan mesin sama sekali tidak akan merintangi sebagian besar sistem radio pabrik yang beroperasi pada UHF ke atas.

III.4.2. Interferensi

Interferensi pada kanal radio pabrik disebabkan antara lain oleh banyaknya pemakai yang berdekatan dalam pabrik, daya pancar yang terlalu besar dan dapat juga disebabkan oleh sistem serupa yang saling berdekatan. Masalah interferensi ini penting sekali karena akan mempengaruhi performance dari kanal radio pabrik.

Untuk itu interferensi harus ditekan atau bahkan bila mungkin dihilangkan. Penjelasan yang lengkap mengenai interferensi dan teknik untuk menekannya akan dibahas pada bab berikutnya.

BAB IV

TEKNIK OPTIMASI KANAL RADIO PABRIK

Dari hasil-hasil pengukuran yang dibahas pada bab sebelumnya diketahui bahwa kanal radio pabrik mempunyai karakteristik yang berbeda dengan kanal komunikasi radio pada ruang terbuka. Telah ditemukan bahwa pada sebuah daerah lokal, komponen multipath individu tidak mengalami fading yang berarti ketika lintasan LOS ada antara pemancar dan penerima sementara beberapa fading yang cukup sering dan pembayangan (shadowing) dialami oleh lintasan OBS. Besarnya path loss sangat berkorelasi dengan jarak pemancar-penerima. Secara rata-rata path loss merupakan fungsi jarak dengan eksponen 2,2.

Multipath delay spread mempunyai nilai antara 40 sampai 800 ns. Harga mean excess delay ($\bar{\tau}$) dan rms delay spread (σ) berada pada range 30 sampai 300 ns. Harga σ terburuk 300 ns ditemukan pada sebuah gang dari pabrik pengolah logam modern.

Data-data yang ada juga menunjukkan bahwa di dalam bangunan pabrik, umur bangunan, peralatan dan barang-barang yang digunakan dalam pabrik, lokasi dinding dan tinggi atap adalah faktor kunci dalam menentukan bentuk dan perluasan multipath profile. Delay spread juga nampak tidak berhubungan dengan jarak lintasan dan path loss.

Dengan diketahuinya karakteristik propagasi gelombang radio dalam pabrik di atas, maka dapat digunakan beberapa teknik optimasi yang dapat

mengurangi besarnya rms delay spread, menekan fading, menaikkan SNR atau menurunkan BER dan mengkompensasi kerugian lain akibat adanya pemantulan berulang dalam bangunan pabrik.

Selain itu diperlukan juga beberapa teknik untuk memenuhi tuntutan pemakai jamak (multi-user), yaitu dengan penggunaan teknik multiple access yang sesuai, pemakaian diversiti, *optimum combining* dan pengaturan daya untuk mengurangi interferensi intersimbol.

IV.1. SISTEM ANTENA TERDISTRIBUSI

Ide untuk implementasi sistem komunikasi radio yang melayani seluruh bagian pabrik dengan menggunakan sebuah antena tunggal pusat adalah suatu usulan yang menarik. Tetapi berdasarkan pada pengukuran redaman dan multipath delay spread sinyal di atas, pendekatan di atas hanya terbatas untuk bangunan pabrik yang kecil dan untuk tipe sistem FDMA narrow-band dengan keandalan dan fleksibilitas yang terbatas.

Pengukuran-pengukuran yang telah dilakukan di atas terutama menggunakan sistem antena tunggal yang melayani keseluruhan bangunan pabrik. Sistem ini digunakan karena dua alasan utama yaitu mengurangi jumlah *base station* yang dibutuhkan dan meminimumkan jumlah kabel yang dipakai. Tetapi ada beberapa kelemahan tersembunyi dari sistem ini antara lain :

1. *Multipath Delay Spread*, khususnya di dalam gedung-gedung yang besar, akan memerlukan suatu *adaptive equalizer* untuk melengkapi protokol komunikasi yang fleksibel seperti time-division multiple access (TDMA). Pemakaian

equalizer tentu saja akan menaikkan kebutuhan biaya dan daya. Sebaliknya protokol-protokol yang lain tidak membutuhkan equalizer.

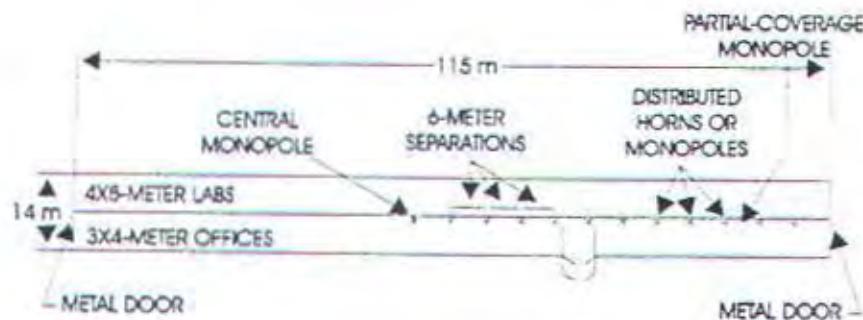
2. Losses propagasi antara *portable unit* dan *base station* bisa sangat besar, khususnya dalam gedung yang besar. Ini berarti akan membutuhkan daya pancar yang lebih besar untuk mencapai harga SNR yang diinginkan. Hal ini juga berlaku baik menggunakan metode akses TDMA, CDMA, bahkan FDMA. Perlunya daya pancar yang kuat akan menjadikan suatu sistem, yang seseorang tidak akan ingin menggunakannya karena kenyataan atau bahkan anggapan bahwa itu akan merugikan kesehatan. Juga pemakaian daya yang besar akan menyebabkan portable unit memerlukan tambahan suplai baterai.
3. Sinyal dari sebuah antena utama yang melayani seluruh bagian bangunan akan menembus bangunan yang berdekatan. Jadi sistem komunikasi radio dalam ruang tertutup harus menggunakan pita frekuensi yang berbeda. Ini berarti membutuhkan pengaturan frekuensi dalam kota yang sangat sulit mengingat perkembangan yang cukup pesat dalam bidang ini.

Oleh karena itu diperlukan suatu sistem lain yang mampu mengkompensasi kelemahan di atas. Berikut ini di sajikan hasil-hasil pengukuran rms delay spread dan redaman sinyal untuk sistem antena terdistribusi seperti pada gambar 4-1. Gambar tersebut juga memperlihatkan letak dari bermacam-macam antena yang digunakan dalam studi ini.

Pengukuran dilakukan dalam kawasan waktu. Secara singkat, sederetan pulsa-pulsa 10 ns seperti pada radar 1,5 GHz dipancarkan melalui kanal dengan menggunakan sistem antena yang sedang diuji dalam studi ini yang selalu

menghasilkan gelombang dengan polarisasi vertikal. Pada penerima dipakai sebuah antena monopole omnidirectional dengan polarisasi vertikal yang ditempatkan 2m di atas lantai diikuti dengan sebuah *low-noise* FET RF amplifier dan sebuah *sensitive square-law envelope detector*. Output detektor yang menyatakan magnitudo kuadrat dari respon pulsa kanal ditampilkan dalam *computer-controlled digital storage oscilloscope*. Antena penerima digerakkan sepanjang ruangan dan gang utama pada lantai dasar dari gedung tersebut dan respon pulsa yang bersesuaian untuk tiap-tiap lokasi direkam dalam disket oleh komputer.

Titik-titik pengukuran diletakkan pada jarak 0,23 m (dibentuk oleh tegel lantai standart 9 in). Kemudian komputer digunakan untuk perhitungan redaman dan lebar delay *rms* yang bersesuaian dengan masing-masing pulsa respon yang diterima. Untuk lebih mendekati keadaan asli dari kanal radio ruang tertutup dilakukan juga pengukuran respon frekuensi yang dilakukan dengan menjaga antena pemancar dan penerima tetap ditempat setelah pengukuran respon pulsa dan menghubungkannya dengan kabel koaksial ke 1,45 - 1,55 GHz, *frequency-swept microwave network analyzer*.



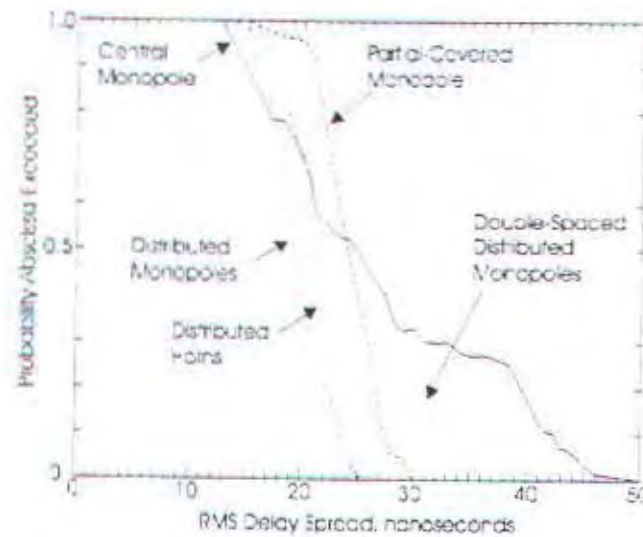
Gambar 4-1¹⁾
FOORPLAN BANGUNAN BESERTA LOKASI
DARI BERMACAM-MACAM ANTENA

IV.1.1. Penggunaan Sel Kecil

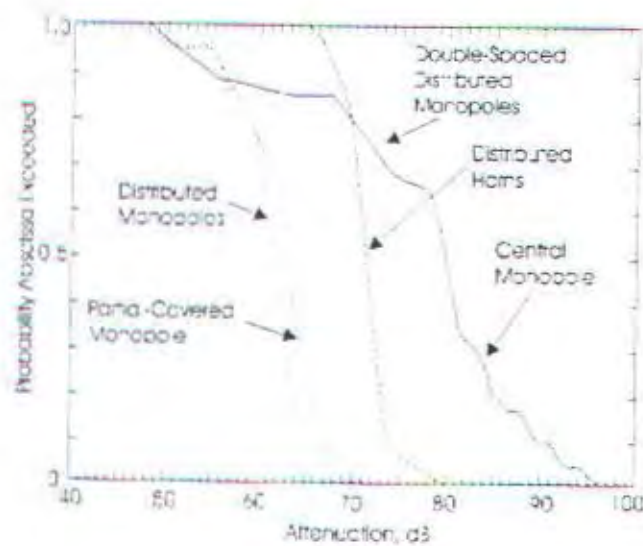
Pertama sistem di atas dipandang sebagai satu sel yang langsung dilayani oleh satu antena monopole pusat. Distribusi kumulatif dari delay spread rms dan redaman dari kanal antara antena tersebut dan sebuah antena monopole omnidirectional yang ditempatkan dalam berbagai ruang dari bangunan digambarkan dengan garis kontinyu pada gambar 4-2 dan 4-3. Harga maksimum dan median dari delay spread rms adalah 50 dan 25 ns. Harga yang bersesuaian untuk redaman sinyal adalah 96 dan 80 dB.

Sekarang sistem dibagi dalam tiga sel, masing-masing dilayani oleh satu antena monopole pada pusatnya. Dalam sistem komunikasi yang menggunakan pengaturan seperti ini, masing-masing sel akan bekerja dengan pita frekuensi yang berbeda. Distribusi kumulatif dari delay spread rms dan redaman sinyal yang didapat untuk sistem *partial-coverage* ini terdapat pada gambar 4-2 dan 4-3.

¹⁾ A.A.M. Saleh, "Distributed Antennas for Indoor Radio Communications", IEEE, vol. COM-35, '87



Gambar 4-2²⁾
STATISTIK DELAY SPREAD DARI
BERMACAM-MACAM SISTEM ANTENA



Gambar 4-3³⁾
STATISTIK REDAMAN DARI
BERMACAM-MACAM SISTEM ANTENA

²⁾ ibid, hal. 1248

³⁾ ibid, hal. 1248

Sebagai perbandingan terhadap sistem *total-coverage* dengan satu antena monopole pusat, terlihat bahwa nilai median rms delay spread tidak berubah, tetapi harga akhirnya yang dikurangi. Misalnya harga maksimum yang diteliti dikurangi dari 50 menjadi 30 ns. Tetapi jauh lebih penting harga redaman maksimum dikurangi 96 menjadi 70 dB. Pengurangan redaman 26 dB ini bisa cukup penting dalam implementasi sebuah sistem komunikasi radio ruang tertutup dengan daya pancar yang diijinkan.

Kemudian sistem di ubah lagi menggunakan 11 antena monopole terdistribusi sepanjang setengah bagian sebelah kanan dari bangunan. Pada pengukuran berikutnya dilakukan sedikit modifikasi dengan mengubah jarak antena terdistribusi menjadi dua kalinya dengan maksud penghematan. Dan yang terakhir antena yang digunakan adalah antena horn. Hasil lengkap dari pengukuran delay spread rms dan redaman sinyal terdapat pada gambar 4-2 dan 4-3.

IV.1.2. Pemakaian Antena Terdistribusi

IV.1.2.1. Sistem Distribusi

Bentuk klasik dari antena terdistribusi adalah yang dikenal dengan sebutan *leaky feeder*. Umumnya ini terdiri dari sebuah kabel koaksial yang perisainya berbentuk tidak rapat untuk mengijinkan sinyal menerobos melaluinya dan beradiasi sepanjang kabel tersebut. Tentu saja karena sifat resiprositas, medan luar yang datang pada kabel akan dikopel ke dalam kabel tersebut. Sistem seperti

ini digunakan pada komunikasi radio dalam terowongan, tambang dan sebagainya.

Untuk mengontrol polarisasi dengan baik, untuk menyamakan daya pancar (atau daya terima) sepanjang kabel, dan untuk mengurangi losses ohmic, digunakan implementasi diskrit dari leaky feeder. Seperti nampak pada gambar 4-4, ini dilakukan dengan mengkaskadekan kabel koaksial losses rendah dengan panjang yang sama dan three-port directional coupler, dengan sebuah antena dihubungkan pada masing-masing coupler.

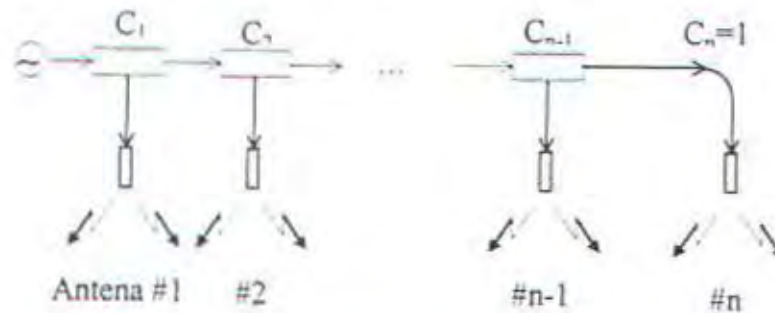
Faktor kopling daya C_1, C_2, \dots, C_n dari berbagai directional coupler dipilih sedemikian rupa sehingga daya yang dipancarkan dari masing-masing antena akan sama. Antena terakhir yang ke- n dihubungkan secara langsung dengan kabel koaksial sehingga $C_n = 1$. Untuk menghitung harga faktor kopling yang lain, dimisalkan $L (>1)$ adalah rasio daya yang menyatakan kombinasi dari losses satu bagian kabel dan excess loss dari coupler, yang dianggap sama untuk semua coupler. Dapat ditunjukkan bahwa untuk menyamakan daya pancar, maka harus dipenuhi :

$$C_i = \frac{L - 1}{L^{n+1-i} - 1}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (4-1)$$

Rasio daya pancar yang bersesuaian T , yang menyatakan bagian dari daya generator yang dipancarkan oleh tiap-tiap antena, diberikan sebagai :

$$T = C_1 / L \approx (L - 1) / L^{n+1} \quad (4-2)$$

dimana dianggap bahwa kabel yang menghubungkan generator ke coupler pertama adalah sama dengan yang digunakan untuk menghubungkan dua coupler.



GAMBAR 4-4⁴⁾
PENGATURAN SISTEM ANTENA TERDISTRIBUSI

Seperti ditunjukkan pada gambar 4-1, untuk menjangkau separoh bangunan, digunakan $n = 11$ antenna terdistribusi, yang dipisahkan dengan jarak kira-kira 6 m. Dalam sistem yang sesungguhnya, generator akan ditempatkan ditengah-tengah gedung, dan separoh dayanya akan diarahkan kepada kedua sistem antenna terdistribusi yang menjangkau dua paroh dari gedung.

IV.1.2.2. Antena Monopole Omnidirectional Terdistribusi

Sebuah antenna monopole $\lambda/4$ vertikal ditempatkan di atas bidang penghantar sempurna dihubungkan dengan tiap-tiap posisi *coupler* yang ditandai dengan X pada gambar 4-1. Masing-masing antenna ini mempunyai pola radiasi omnidirectional horisontal. Distribusi kumulatif dari rms delay spread dan redaman sistem ini ditunjukkan pada gambar 4-2 dan 4-3 dengan titik-garis. Jika dibandingkan dengan hasil pengukuran pada cakupan total oleh sebuah antenna pusat, terlihat bahwa rms delay spread maksimum dipotong dengan faktor dua dan

⁴⁾ ibid, hal. 1249

redaman maksimum dikurangi dengan 25 dB. Hasil ini menunjukkan adanya perbaikan yang berarti jika dibandingkan dengan sistem antena tunggal untuk melayani seluruh bangunan.

Jarak 6 m antara komponen antena tersebut dipilih karena ini adalah jarak terbesar yang menghasilkan lebih banyak atau lebih sedikit kuat sinyal yang sama pada titik-titik yang ditempatkan yang berlawanan dengan antena dan di tengah-tengah di antara dua elemen antena. Tetapi karena keuntungan ekonomis, diselidiki juga kasus dimana jarak antar antena diperbesar dua kali. Dari gambar 4-2 dan 4-3 terlihat bahwa hasil dari sistem terakhir lebih jelek dibanding dengan sistem dengan jarak antar elemen 6 m.

IV.1.2.3. Antena Double-Horn Terdistribusi

Pantulan dari pintu logam yang berada di ujung bangunan berpengaruh cukup besar dalam pengukuran rms delay spread. Pertanyaan yang muncul seperti apakah efek yang sama terjadi atau tidak dalam sistem antena omnidirectional terdistribusi di atas, karena mereka memancarkan gelombang ke arah pintu tersebut. Jika jawabannya ya, maka mengganti antena omnidirectional tersebut dengan antena yang mempunyai pola radiasi "angka delapan" dengan nolnya di arahkan pada pintu tersebut akan mengurangi rms delay spread yang diterima. Hasil pengukurannya disajikan dalam gambar 4-2 dan 4-3. Di sana terlihat bahwa rms delay spread kumulatifnya hampir sama dengan sistem yang menggunakan antena omnidirectional. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut, yaitu bahwa antena penerima selalu lebih dekat ke salah satu dari antena pemancar yang

terdistribusi daripada ke pintu tersebut sehingga penerima akan menerima sinyal yang lebih kuat dari antena pemancar daripada yang dipantulkan oleh pintu tersebut.

Ini berarti bahwa pemakaian antena double-horn terdistribusi kurang sesuai karena alasan redaman yang lebih besar (gambar 4-3), biaya implementasi yang lebih mahal, sedangkan rms delay spread tidak berubah.

IV.2. Optimum Combiner

IV.2.1. Optimum Combining

Interferensi pada penerima dapat dikurangi dengan optimum combining. Dengan teknik ini, sinyal-sinyal yang diterima oleh beberapa antena diberi bobot dan dikombinasikan untuk memaksimalkan SINR. Jadi diversity digunakan untuk menekan sinyal penginterferensi dan menaikkan sinyal yang diinginkan untuk diterima.

Optimum combining telah ditunjukkan secara sebagian mampu mengurangi interferensi dalam sistem baik dengan fading maupun tanpa fading. Sistem radio ruang tertutup yang dipelajari di sini berada diantara dua kasus di atas karena meskipun ada fading, itu dapat dikompensasikan dengan mengatur daya pancar.

Tanpa fading, optimum combining dapat menghilangkan $M - 1$ penginterferensi dengan M antena jika perbedaan sudut antar sinyal yang diinginkan dengan sinyal penginterferensi cukup besar. Dengan fading, seperti dalam komunikasi radio bergerak, perbedaan sudut tidak cukup besar karena

adanya lintasan jamak (multipath). Kenyataannya, penerima dapat menekan penginterferensi dan menaikan sinyal yang diinginkan untuk diterima, selama daya sinyal yang diinginkan dan fase agak berbeda dari daya dan fase sinyal penginterferensi yang diterima pada lebih dari satu antena. Jadi dalam sistem yang menggunakan beberapa antena untuk diversiti jarak, arah, polarisasi dan atau medan, probabilitas untuk menjadi tidak dapat menekan sinyal penginterferensi adalah sangat kecil. Lebih jauh lagi, karena dengan adanya dynamic channel assignment kanal dapat diubah jika interferensi tidak dapat ditekan, sistem dengan optimum combining dapat mengatasi hampir sebagian besar masalah interferensi.

Optimum combining hanya perlu digunakan pada penerima base station. Transmisi ulang adaptif dengan pembagian waktu dapat digunakan untuk memperbaiki penerimaan pada remote tanpa tambahan antena pada remote. Dengan transmisi ulang adaptif, base station mentransmisikan pada frekuensi yang sama dengan frekuensi yang diterima, dengan menggunakan kompleks konjugasi dari bobot yang diterima. Dengan pembagian waktu, sebuah kanal tunggal berbagi waktu untuk transmisi dalam kedua arah. Jadi dengan optimum combining, selama transmisi dari remote ke base, bobot-bobot antena penerima diatur untuk memaksimalkan SINR pada output penerima. Kemudian selama transmisi dari base ke remote, kompleks konjugasi dari bobot-bobot yang diterima digunakan supaya sinyal-sinyal dari antena-antena base station berkombinasi untuk menaikkan penerimaan sinyal yang diinginkan pada remote dan untuk menekan sinyal-sinyal pada remote yang lain. Jadi dapat diperoleh keuntungan

dari optimum combining baik pada remote maupun base station dengan penggunaan antena jamak hanya pada base station saja.

Seperti dibahas di muka, sebuah sistem dengan optimum combining dapat menekan sinyal-sinyal penginterferensi dengan probabilitas yang tinggi bahkan jika daya mereka sama atau lebih besar dari daya sinyal yang diinginkan. Oleh karena itu, dengan optimum combining, beberapa sinyal dapat memakai kanal yang sama secara serentak, yang berarti menaikkan kapasitas. Juga sinyal-sinyal dari sistem-sistem yang lain dapat ditekan bahkan jika mereka lebih kuat dari sinyal yang diinginkan.

IV.2.2. Gambaran dan Persamaan Pembobotan

Gambar 4-5 menunjukkan sebuah diagram blok dari *combiner* dengan M elemen antena diversiti. Sinyal yang diterima oleh elemen ke- i yaitu $y_i(t)$ dipecah dengan sebuah *quadratur hybrid* ke dalam sebuah sinyal *in-phase* $x_{Ii}(t)$ dan sebuah sinyal *quadratur* $x_{Qi}(t)$. Sinyal-sinyal ini kemudian dikalikan dengan sebuah bobot yang dapat dikontrol $w_{Ii}(t)$ atau $w_{Qi}(t)$. Sinyal-sinyal berbobot ini kemudian dijumlahkan untuk membentuk output array $s_o(t)$.

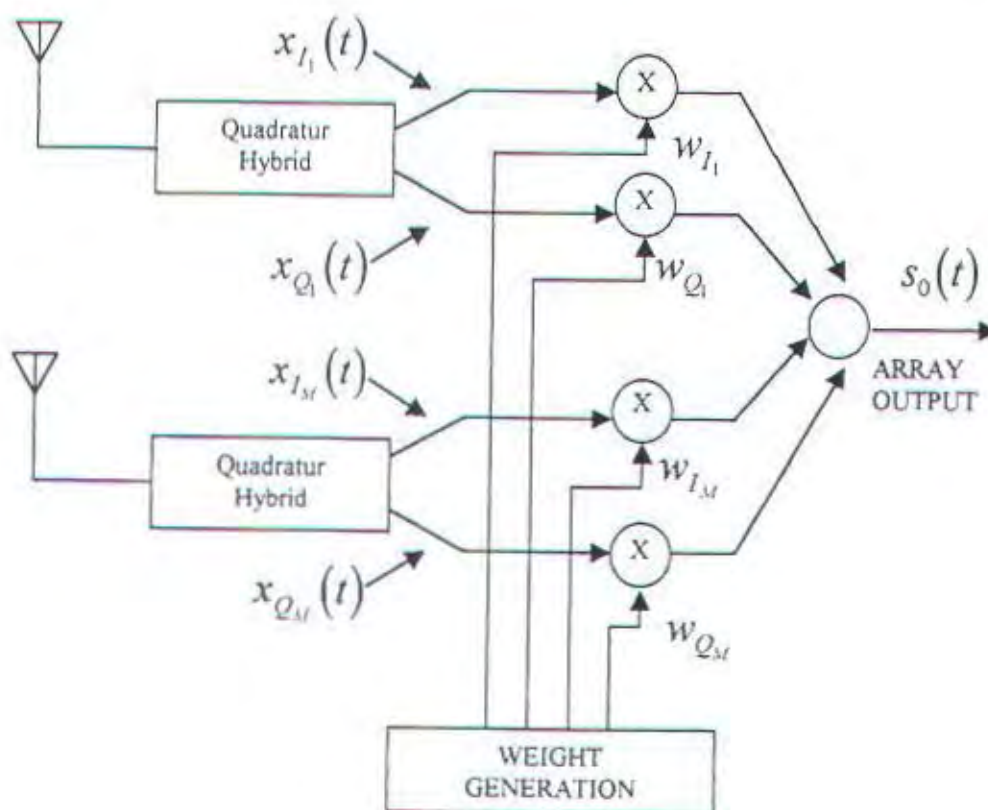
Misalkan matriks korelasi dari interferensi plus noise yang diterima diberikan oleh :

$$R_{nn} = \sigma^2 I + \sum_{j=1}^L u_j u_j^* \quad (4-3)$$

dimana σ^2 adalah daya noise, I adalah matriks identitas, L adalah jumlah penginterferensi, u_j adalah vektor propagasi sinyal penginterferensi ke- j , dan

superscript * dan T menunjukkan konjugasi dan transpose. Dalam persamaan (4-3), korelasi adalah pada suatu periode yang jauh lebih kecil dari kebalikan laju fading, yaitu u_i dan u_d dianggap secara beralasan konstan selama periode penghitungan BER. Di sini diasumsikan bahwa laju fading adalah jauh lebih kecil dari laju bit. Persamaan untuk bobot-bobot yang memaksimalkan SINR output adalah :

$$w = \alpha R_{nn}^{-1} u_d^* \quad (4-4)$$



Gambar 4-5⁵⁾
 DIAGRAM BLOK COMBINER DENGAN M ELEMEN ANTENA DIVERSITI

⁵⁾J.H. Winters, "Optimum Combining for Indoor Radio Systems...", IEEE, vol. COM-35, No. 11, '87

dimana w adalah vektor bobot kompleks, α adalah sebuah konstanta, superscript -1 menandai invers matrik, dan u_d adalah vektor propagasi sinyal yang diinginkan.

IV.2.3. Asumsi awal dan Analisa

Dalam bagian ini, akan diasumsikan bahwa Rayleigh fading independen (yang disebabkan oleh lintasan jamak) pada tiap-tiap antena dengan *shadow fading* atau rintangan yang sama pada masing-masing antena untuk sinyal yang diberikan. Tentu saja fading yang dihasilkan oleh lintasan jamak mungkin tidak Rayleigh di semua lokasi dalam bangunan. Tetapi harus ditekankan bahwa optimum combining selalu memaksimalkan SINR, bahkan jika fadingnya bukan Rayleigh.

Dengan fading Rayleigh independen pada tiap-tiap antena dan pengontrolan daya pancar, vektor propagasi dari sinyal yang diinginkan adalah :

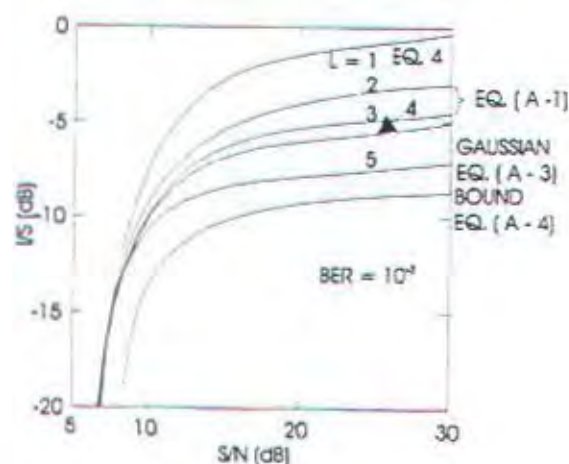
$$u_d = \begin{bmatrix} u_{d1} \\ \vdots \\ u_{dM} \end{bmatrix} = \left[\frac{P_{rd}}{\sum_{j=1}^M |v_{dj}|^2} \right]^{1/2} \begin{bmatrix} v_{d1} \\ \vdots \\ v_{dM} \end{bmatrix} \quad (4-5)$$

dimana $P_{rd} (= u_d^H u_d)$ adalah daya sinyal total yang diinginkan untuk diterima dan u_{dj} adalah variabel acak Gaussian kompleks independen. Karena pengontrolan daya pancar, komponen u_d tidak independen. Walaupun fase dari komponen-komponen adalah independen, amplitudo (daya) adalah tidak independen. Vektor propagasi sinyal penginterferensi (u_j) untuk pemakai penginterferensi di dalam sistem pemakai jamak per kanal mempunyai karakteristik seperti u_d dalam persamaan

(4-5). Untuk interferensi dari sistem yang lain, karakteristik dari u_j dapat bervariasi secara luas.

IV.2.4. SINR dan BER

Secara umum diinginkan untuk mencapai harga BER serendah mungkin untuk sistem digital. Tetapi optimum combiner memaksimalkan SINR. Dengan noise dan interferensi Gaussian, memaksimalkan SINR tentu saja meminimalkan BER. Tetapi dalam sistem ini, interferensi adalah berasal dari satu atau lebih sinyal-sinyal PSK. Oleh karena itu memaksimalkan SINR tidak perlu meminimalkan BER, walaupun ini secara sebagian mengurangi BER. Jadi karena tidak ada rumus sederhana saat ini untuk menentukan bobot-bobot yang meminimalkan BER, optimum combining digunakan.



Gambar 4-6⁶⁾
GRAFIK I/S TERHADAP S/N UNTUK BER 10^{-3}

⁶⁾ibid, hal. 1223

Seperti dibicarakan di atas, interferensi mempunyai efek yang berbeda dari noise terhadap BER. Kenyataannya, efek interferensi tergantung pada noise dan sebaliknya, seperti ditunjukkan pada gambar 4-6. Jadi dalam analisa ini, pertama ditentukan bobot-bobot yang memaksimalkan SINR dan kemudian menentukan I/S dan S/N pada output optimum combiner. BER kemudian dapat ditentukan dari persamaan (4) untuk $L = 1$ dan (A-1) untuk penginterferensi jamak.

Untuk diversity combiner pada gambar 4-5, dapat ditunjukkan bahwa rasio interferensi terhadap daya sinyal yang diinginkan I/S dan rasio sinyal yang diinginkan terhadap noise S/N pada output array diberikan oleh :

$$I/S = \frac{\sum_{j=1}^L |w^{\dagger} u_j|^2}{|w^{\dagger} u_d|^2} \quad (4-6)$$

dan

$$S/N = \frac{|w^{\dagger} u_d|^2}{\sigma^2 w^{\dagger} w} \quad (4-7)$$

dimana w diberikan oleh persamaan (4-4) dan superscript \dagger menandakan kompleks konjugasi transpose. Untuk kondisi tanpa interferensi ($L = 0$), dari persamaan (4-3) dan (4-4),

$$w = \frac{\alpha}{\sigma^2} u_d^* \quad (4-8)$$

dan oleh karena itu, dengan catatan bahwa $P_{rd} (= u_d^{\dagger} u_d)$, dari persamaan (4-7),

$$S/N = \frac{P_{rd}}{\sigma^2} \quad (4-9)$$

Dengan interferensi, optimum combining menyebabkan SN menjadi sedikit lebih kecil dari persamaan (4-9), sementara I/S secara sebagian lebih kecil dari yang diterima pada tiap-tiap antena.

Anggap bahwa sebuah kanal dapat diterima jika BER-nya tidak melampaui 10^{-3} , maka lebih diinginkan kanal dengan probabilitas BER lebih kecil dari 10^{-3} (dan tidak tertarik pada BER rata-rata). Yaitu, probabilitas sebuah kanal yang diberikan dapat dipakai dan tentu saja probabilitas bahwa SN dan I/S berada di bawah kurva pada gambar 4-6.

IV.2.5. Banyak Pemakai Per Kanal

Seperti dibahas sebelumnya, karena optimum combining dapat menekan sinyal-sinyal penginterferensi bahkan ketika daya mereka sama atau lebih besar dari daya sinyal yang diinginkan, banyak pemakai per kanal adalah mungkin. Jadi kapasitas yang jauh lebih besar dari sistem dengan antena tunggal dapat dicapai. Di sini akan dicoba menentukan kapasitas tersebut.

Sistem yang diajukan dengan banyak pemakai per kanal frekuensi mempunyai sebuah base station dengan M antena ($M > 1$) dan banyak remote masing-masing dengan satu antena. Base station mempunyai sebuah optimum combiner untuk masing-masing sinyal yang dipancarkan remote yang menggunakan sinyal-sinyal yang diterima oleh masing-masing dari M antena. Jadi perencanaan dari sinyal-sinyal yang diinginkan dan penginterferensi tergantung

hanya pada optimum combiner mana yang sedang diperhatikan. Semua sinyal tentunya diinginkan pada penerima.

Kapasitas dari sistem dengan banyak pemakai per kanal telah dihitung pertama dengan menggunakan simulasi Monte Carlo untuk menentukan probabilitas bahwa (untuk S/N dan jumlah antena yang diberikan) sejumlah pemakai yang diberikan dapat menggunakan kanal frekuensi yang sama secara serentak. Dari probabilitas ini, kemudian dihitung probabilitas, bahwa dengan diberikan jumlah pemakai secara serentak, pemakai yang lain dapat ditambahkan ke kanal tersebut. Akhirnya, hasil-hasil ini digunakan untuk menentukan kapasitas sistem dengan probabilitas blocking 0,01 (yaitu 99 % tidak terblock).

Analisa menggunakan notasi berikut ini. Misalkan K adalah jumlah pemakai serentak per kanal (semua dengan $BER < 10^{-3}$). Juga, misalkan Γ_d dan Γ_j adalah S/N rata-rata yang diterima per antena sinyal yang diinginkan dan sinyal-sinyal penginterferensi. Jadi, $\Gamma_d = P_{rd} / M\sigma^2$, dan untuk sistem dengan banyak pemakai per kanal, $\Gamma_j = \Gamma_d$ untuk $j = 1$ sampai L dimana $L = K - 1$. Hasil-hasil ini diberikan sebagai fungsi dari Γ_d . Ini karena Γ_d menentukan daya pancar yang dibutuhkan oleh remote atau secara alternatif dengan daya pancar maksimum yang tetap, menentukan jarak jangkauan maksimum. Untuk sebuah S/N 6,8 dB dibutuhkan untuk $BER 10^{-3}$, dan dengan menganggap kuat sinyal jatuh menurut kuadrat jarak, sebuah kenaikan 9 dB dalam Γ_d yang diperlukan dengan daya pancar yang tetap memperlihatkan reduksi jarak 50 %.

Probabilitas P_k bahwa K pemakai dapat menggunakan kanal yang sama secara serentak telah ditentukan melalui simulasi komputer. Sejumlah besar kasus (tergantung pada penempatan remote secara acak) telah dibuat, dan probabilitas dihitung dengan menentukan bagian dari kasus-kasus di mana semua sinyal mempunyai harga BER lebih kecil dari 10^{-3} . Jadi untuk masing-masing kasus prosedur berikut ini digunakan. Pertama vektor propagasi sinyal dibangkitkan untuk masing-masing sinyal dengan :

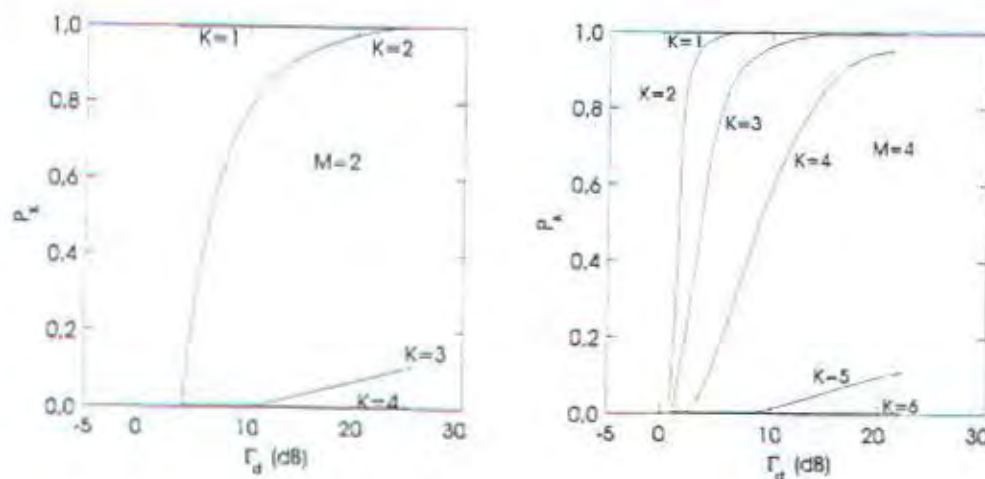
- 1) membangkitkan bilangan acak Gaussian kompleks independen, dan
- 2) menghitung u_d dari persamaan (7)

Kedua, dengan vektor-vektor sinyal ini ditentukan apakah sinyal yang diinginkan pada output dari setiap optimum combiner mempunyai BER lebih kecil dari 10^{-3} , untuk tiap-tiap sinyal,

- 1) merencanakan sinyal sebagai sinyal yang diinginkan dan sinyal-sinyal lain sebagai sinyal-sinyal penginterferensi,
- 2) menghitung bobot-bobot optimum dengan persamaan (6),
- 3) menghitung S/N dan I/S dengan persamaan (8) dan (9), dan
- 4) menentukan apakah S/N dan I/S berada dibawah kurva yang sesuai dari gambar 4-6.

Gambar 4-7 sampai 4-9 menunjukkan probabilitas bahwa K pemakai dapat menggunakan kanal yang sama secara serentak terhadap S/N rata-rata yang diterima yang diinginkan per antena dengan dua sampai sembilan antena. Sepuluh ribu kasus per titik data digunakan. Untuk mempertahankan waktu komputer, hanya sampai enam pemakai serentak yang diperhatikan. Gambar-gambar

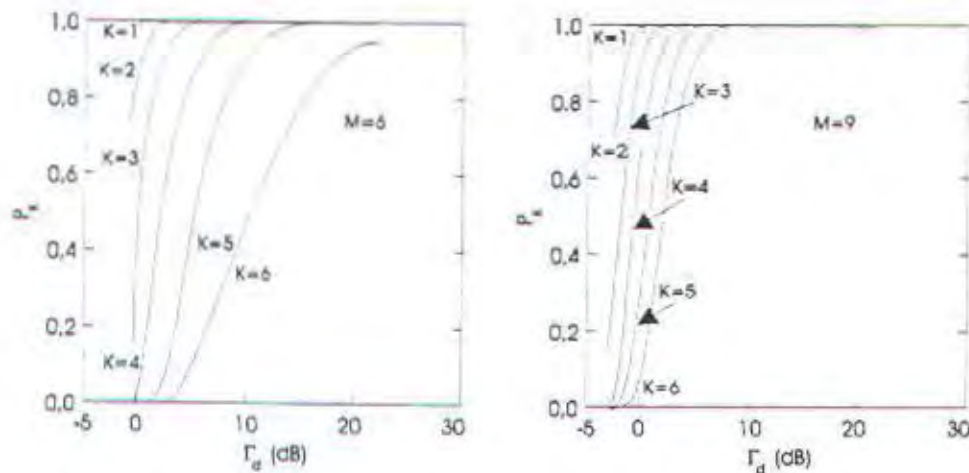
menunjukkan bahwa satu pemakai per kanal selalu mungkin jika Γ_d lebih besar dari $7 - 10 \log_{10} M$ dB, dan bahwa untuk $K > 1$, probabilitas kemampuan menampung K pemakai serentak naik terhadap Γ_d . M pemakai per kanal dengan probabilitas tinggi adalah mungkin jika Γ_d dinaikkan sampai 20 dB, tetapi dengan harga K lebih tinggi hanya mungkin pada probabilitas yang jauh lebih rendah. Seiring dengan bertambahnya jumlah antenna, diperlukan kenaikan Γ_d yang lebih kecil untuk banyak pemakai pada probabilitas yang tinggi. Misalnya, dengan sembilan antenna, hanya dibutuhkan sebuah kenaikan Γ_d 10 dB untuk menaikkan kapasitas lipat enam. Untuk daya pancar yang tetap dalam sebuah bangunan yang umum, ini menyatakan pengurangan jarak maksimum 50 %.



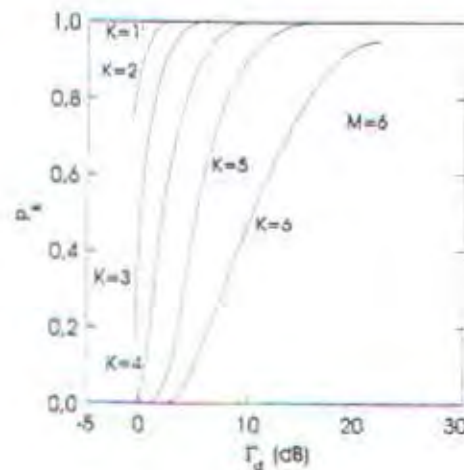
Gambar 4-7⁷⁾

PROBABILITAS BAHWA K PEMAKAI DAPAT MENGGUNAKAN KANAL YANG SAMA SECARA SERENTAK DENGAN BER LEBIH KECIL DARI 10^{-3} TERHADAP SNR YANG DINGINKAN DITERIMA PER ANTENA UNTUK ANTENA PENERIMA SEBANYAK $M=2$ DAN $M=4$

⁷⁾ibid, hal. 1226

Gambar 4-8⁸⁾

PROBABILITAS BAHWA K PEMAKAI DAPAT MENGGUNAKAN KANAL YANG SAMA SECARA SERENTAK DENGAN BER LEBIH KECIL DARI 10^{-3} TERHADAP SNR YANG DINGINKAN DITERIMA PER ANTENA UNTUK ANTENA PENERIMA SEBANYAK $M=6$ DAN $M=9$

Gambar 4-9⁹⁾

PROBABILITAS BAHWA PEMAKAI KE- K DAPAT PADA KANAL YANG TELAH MEMPUNYAI $K-1$ PEMAKAI DENGAN BER LEBIH KECIL DARI 10^{-3} UNTUK SEMUA K PEMAKAI TERHADAP SNR YANG DINGINKAN PER ANTENA UNTUK $M=6$ ANTENA PENERIMA

⁸⁾ ibid, hal. 1226

⁹⁾ ibid, hal. 1226

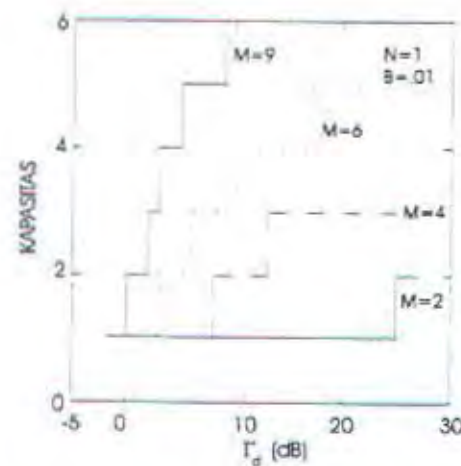
Sekarang perhatikan probabilitas P_{KK-1} untuk dapat menambah pemakai ke- K (dengan $\text{BER} < 10^{-3}$ untuk semua K pemakai). Yaitu P_{KK-1} adalah probabilitas bahwa satu pemakai lagi dapat menggunakan kanal yang sama jika diberikan $K-1$ pemakai sedang menggunakan kanal. Probabilitas ini dapat diturunkan dari hasil-hasil sebelumnya dengan catatan bahwa BER untuk masing-masing pemakai yang ada hanya dapat dinaikkan (bukan diturunkan) dengan menambah sebuah penginterferensi tambahan. Jadi kasus-kasus dimana $\text{BER} < 10^{-3}$ dengan K pemakai adalah himpunan bagian dari kasus-kasus dimana $\text{BER} < 10^{-3}$ dengan $K-1$ pemakai, dan probabilitas penambahan pemakai ke- K adalah P_{KK-1} .

Gambar 4-9 menunjukkan bahwa pemakai ke- K dapat ditambahkan ke sebuah kanal terhadap S/N yang rata-rata yang diterima yang diinginkan per antena dengan enam antena penerima. Probabilitas ini mirip dengan probabilitas untuk K pemakai serentak (gambar 4-8) karena probabilitas penambahan pemakai ke- K secara berhasil umumnya jauh lebih kecil probabilitas untuk $K-1$ pemakai. Hasil serupa didapatkan untuk dua, empat dan sembilan antena penerima.

Probabilitas blocking untuk sebuah kanal tunggal dengan kapasitas K didefinisikan di sini sebagai probabilitas bahwa pemakai ke- K tidak dapat ditambahkan ke dalam sistem, yaitu untuk sistem kanal tunggal ($N=1$),

$$B = 1 - P_{KK-1} \quad (4-10)$$

Jadi probabilitas panggilan terblok untuk sebuah kanal tunggal dapat dihitung secara langsung dari hasil-hasil di atas.

Gambar 4-10¹⁰⁾

KAPASITAS (JUMLAH MAKSIMUM PEMAKAI SERENTAK)
TERHADAP Γ_d (dB) UNTUK SISTEM KANAL TUNGGAL DENGAN
PROBABILITAS BLOCKING 0,01 UNTUK BEBERAPA HARGA M

Gambar 4-10 menunjukkan kapasitas (jumlah maksimum dari pemakai serentak) terhadap Γ_d untuk sebuah sistem kanal tunggal dengan probabilitas blocking 0,01 %. Gambar tersebut menunjukkan bahwa kenaikan Γ_d yang dibutuhkan untuk tiap-tiap pemakai tambahan menjadi lebih kecil sesuai kenaikan jumlah antenna. Misalnya, lima pemakai dengan enam antenna membutuhkan $\Gamma_d = 17$ dB, sementara dengan sembilan antenna hanya diperlukan 5 dB. Juga hasil-hasil tersebut menunjukkan bahwa mendekati M pemakai memungkinkan, tetapi hanya dengan kenaikan sebagian dari Γ_d jika dibandingkan dengan sistem pemakai tunggal. Tetapi banyak pemakai dengan harga Γ_d yang kecil adalah mungkin jika kapasitasnya jauh lebih kecil dari M .

¹⁰⁾ ibid, hal. 1226

Sekarang akan dipelajari sistem kanal jamak ($N > 1$) dimana N adalah jumlah kanal. Karena adanya dynamic channel assignment, kapasitas kanal untuk probabilitas blocking tertentu adalah lebih dari N kali kapasitas sistem kanal tunggal. Kenyataannya dengan dynamic channel assignment, mungkin ada banyak pemakai dalam satu kanal dan hanya sedikit dalam kanal lainnya. Tetapi untuk menyederhanakan analisa, diasumsikan bahwa semua kanal mempunyai K pemakai sebelum beberapa diantaranya mempunyai $K + 1$ pemakai. Ini adalah model terburuk karena kapasitasnya adalah lebih besar jika jumlah pemakai dalam tiap-tiap kanal terdistribusi secara lebih tidak merata.

Sebuah sistem N kanal dengan $N - (I - 1)$ kanal mempunyai K pemakai per kanal dan $I - 1$ kanal mempunyai $K + 1$ pemakai per kanal ($0 < I \leq N$). Maka jumlah total pemakai adalah $NK + (I - 1)$, dan probabilitas blocking untuk pemakai berikutnya adalah :

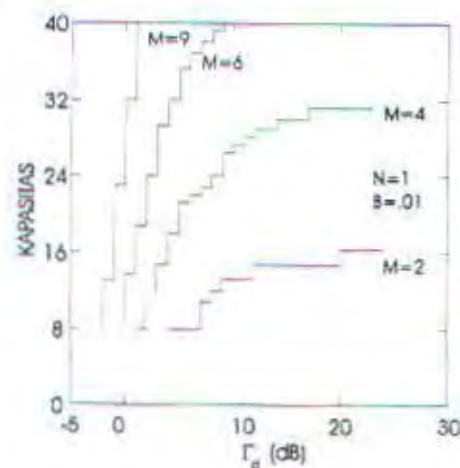
$$B = (1 - P_{K+1/K})^{N \cdot (I-1)} (1 - P_{K+2K+1})^{I-1} \quad (4-11)$$

Yaitu, persamaan (4-11) adalah probabilitas panggilan terblokir untuk sistem dengan kapasitas $NK + I$. Jadi dari hasil sebelumnya pada bagian ini dan persamaan (4-11), kapasitas (jumlah pemakai maksimum) untuk suatu probabilitas blocking yang diberikan dapat dihitung.

Sebagai contoh, sebuah sistem delapan kanal. Gambar 4-11 kapasitas terhadap Γ_d dengan probabilitas blocking 0,01 untuk beberapa harga M . Gambar ini menunjukkan bahwa sebuah kenaikan kapasitas lipat M dapat dicapai dengan M antena jika Γ_d dinaikkan sebesar 20 dB (untuk $M = 2$). Tetapi kenaikan Γ_d yang dibutuhkan berkurang dengan bertambahnya jumlah antena. Lebih lanjut, untuk

kenaikan kapasitas yang lebih kecil dari M kali, harga Γ_d cukup kecil. Misanya dengan sembilan antena, kenaikan kapasitas lipat lima mungkin hanya dengan kenaikan Γ_d 3 dB. Jika jumlah kanal naik, untuk probabilitas blocking yang sama, Γ_d yang dibutuhkan akan turun.

Hasil-hasil tersebut dapat digeneralisasi sebagai berikut. Dalam sistem dengan Rayleigh fading, kenaikan kapasitas lipat M didapatkan karena $M - 1$ sinyal ditekan oleh masing-masing optimum combiner. Jadi jumlah sinyal yang dapat ditekan adalah sama dengan jumlah sinyal dalam lingkungan tanpa fading ($M - 1$). Oleh sebab itu dapat diharapkan bahwa hasil ini akan valid bahkan jika fading tidak Rayleigh dan atau ada lebih dari sembilan antena. Tetapi hasil seperti itu perlu untuk diperiksa ulang dalam sistem praktis.



Gambar 4-11¹¹⁾
KAPASITAS (JUMLAH MAKSIMUM PEMAKAI SERENTAK)
TERHADAP Γ_d (dB) UNTUK SISTEM ENAM KANAL DENGAN
PROBABILITAS BLOCKING 0,01 UNTUK BEBERAPA HARGA M

¹¹⁾ ibid, hal.1227

IV.2.6. Interferensi

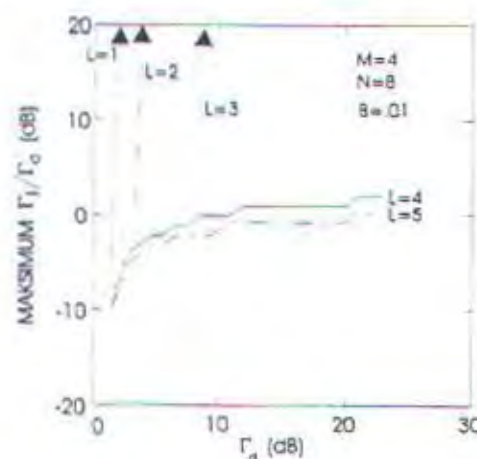
Dalam bagian ini akan ditentukan jumlah dan daya dari sinyal-sinyal penginterferensi yang dapat diterima oleh optimum combiner. Pertama digambarkan bagaimana hasil-hasil tersebut dibangkitkan dan dibahas efek dari interferensi pada optimum combiner. Kemudian hasil-hasil ditunjukkan untuk level interferensi maksimum pada probabilitas blok 0,01 dengan L daya penginterferensi yang sama dan M antena. Akhirnya ditentukan jumlah penginterferensi pada sebarang daya yang dapat diterima.

Probabilitas bahwa L penginterferensi dengan daya yang diterima rata-rata sama memblok kanal untuk sinyal yang diinginkan telah ditentukan dengan simulasi komputer. Sejumlah besar kasus (tergantung pada penempatan remote secara acak) dibangkitkan, dan probabilitas dihitung dengan menentukan perbandingan dari kasus-kasus dimana sinyal tunggal yang diinginkan mempunyai BER lebih dari 10^{-3} . Metode yang digunakan adalah sama dengan yang digambarkan pada bagian di atas, kecuali bahwa hanya ada satu sinyal yang diinginkan dan daya penginterferensi tidak perlu sama dengan daya sinyal yang diinginkan. Hasil-hasil untuk daya interferensi maksimum pada sebuah probabilitas blok yang diberikan didapatkan dengan menaikkan daya penginterferensi (dengan step 1 dB) sampai probabilitas blok melampaui batas yang diberikan.

Bobot-bobot tersebut dipengaruhi oleh daya penginterferensi seperti ditunjukkan pada persamaan (4-3) dan (4-4). Jika $\Gamma_I < 1$ (yaitu daya penginterferensi lebih kecil dari daya noise), interferensi mempunyai efek yang

kecil pada bobot-bobot tersebut, dan rasio interferensi terhadap noise pada output optimum combiner mendekati sama pada input. Tetapi jika $\Gamma_j > 1$, bobot-bobot diatur untuk menekan interferensi pada output sampai sebuah level jauh di bawah noise. Dalam hal ini, menaikkan daya interferensi yang diterima akan menurunkan rasio interferensi terhadap noise pada output optimum combiner.

Optimum combiner dapat menekan penginterferensi secara kuat (jauh di bawah level noise) dan tidak secara kuat menekan sinyal yang diinginkan jika fase sinyal yang diinginkan untuk diterima agak berbeda dari fase sinyal penginterferensi yang diterima pada lebih dari satu antenna. Dengan banyak antenna dan lintasan, sangat tidak mungkin bahwa fase-fasenya akan sama. Oleh karena itu probabilitas bahwa optimum combiner menjadi tidak dapat menekan interferensi dapat diabaikan. Tetapi penginterferensi cukup mengurangi S/N output yang diinginkan.



Gambar 4-12⁽¹²⁾
 MAKSIMUM Γ_j / Γ_o UNTUK PROBABILITAS BLOCKING 0,01 DENGAN
 DELAPAN KANAL DAN ENAM ANTENA

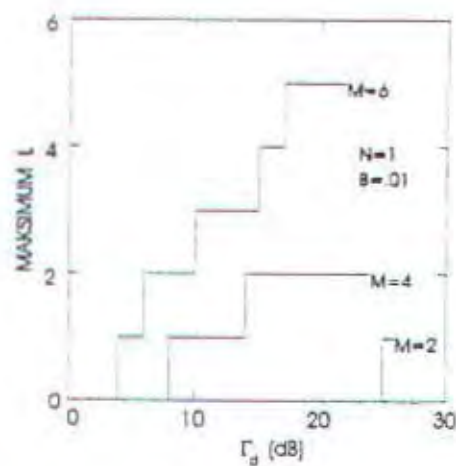
¹²⁾ibid, hal. 1228

Jadi panggilan terblok terjadi ketika S/N diturunkan sampai lebih kecil dari 7 dB (yaitu $\text{BER} > 10^{-3}$) dengan daya penginterferensi yang diterima tinggi. Optimum combiner oleh karena itu dapat menerima interferensi pada sebarang daya dengan probabilitas yang tinggi jika Γ_i cukup besar.

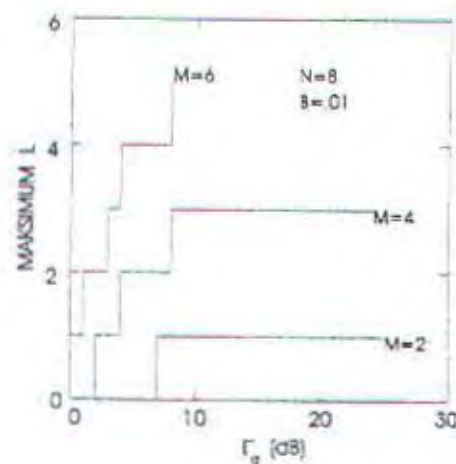
Bagian ini ditunjukkan pada gambar 4-12 untuk $M = 4$. Gambar ini menunjukkan maksimum Γ_i / Γ_d terhadap Γ_d untuk probabilitas blok 0,01 dengan delapan kanal. Jadi probabilitas blok dalam satu kanal adalah 0,56 $[(0,56)^8 \approx 0,01]$. Hasil-hasil menunjukkan bahwa sistem dapat menerima $M - 1$ ($=3$) penginterferensi pada sebarang daya jika Γ_d 7 dB lebih besar dari yang diperlukan tanpa interferensi. Dengan M atau lebih penginterferensi, optimum combiner hanya dapat menerima interferensi yang mempunyai daya hampir sama dengan daya sinyal yang diinginkan bahkan dengan Γ_d yang sangat tinggi. Hasil serupa didapat untuk $M = 2$ dan 4 dengan $N = 1$ dan 8.

Dari hasil di atas, Γ_d yang dibutuhkan sistem untuk dapat menerima L penginterferensi pada sebarang daya dapat ditentukan. Gambar 4-13 menunjukkan jumlah maksimum penginterferensi pada sebarang daya terhadap Γ_d untuk probabilitas blok 0,01 dengan satu kanal. Gambar tersebut menunjukkan bahwa mendekati $M - 1$ penginterferensi dapat diterima dengan kenaikan yang Γ_d besar.

Gambar 4-14 menunjukkan jumlah maksimum penginterferensi pada sebarang daya terhadap Γ_d untuk probabilitas blok 0,01 dengan delapan kanal. $M - 1$ penginterferensi dapat diterima dengan $M = 2, 4$, dan 6 dan kenaikan Γ_d hanya 3, 7, dan 8 dB.

Gambar 4-13¹³⁾

JUMLAH MAKSIMUM PENGINTERFERENSI PADA SEBARANG DAYA TERHADAP Γ_d UNTUK PROBABILITAS BLOCKING 0,01 DENGAN SATU KANAL DAN $M=6, 4$, DAN 2 ANTENA

Gambar 4-14¹⁴⁾

JUMLAH MAKSIMUM PENGINTERFERENSI PADA SEBARANG DAYA TERHADAP Γ_d UNTUK PROBABILITAS BLOCKING 0,01 DENGAN DELAPAN KANAL DAN $M=6, 4$, DAN 2 ANTENA

¹³⁾ ibid, hal. 1228

¹⁴⁾ ibid, hal. 1228

Jadi hasil-hasil dibagian ini menunjukkan bahwa $M - 1$ penginterferensi pada sebarang daya dapat diterima dengan kenaikan Γ_d hanya beberapa dB jika $M \leq 6$. Karena hasil-hasil ini mirip dengan hasil-hasil pada lingkungan tanpa fading (dimana sampai $M - 1$ penginterferensi dapat dihilangkan), dapat diharapkan sekali lagi bahwa hasil-hasil ini akan valid, bahkan jika fading tidak Rayleigh dan / atau ada lebih dari enam antena.

IV.3. Teknik Multiple Access

Sistem komunikasi radio pabrik di masa depan akan mengandalkan teknik-teknik multiple-access untuk menampung banyak terminal-terminal tetap dan bergerak. Teknik-teknik multiple-access seperti Frequency Division Multiple-Access (FDMA), Time-Division Multiple-Access (TDMA), Code Division Multiple-Access (CDMA, juga disebut spread spektrum), dan Carrier-Sense Multiple-Access (CSMA, juga disebut radio paket) membagi kanal-kanal penakai kedalam ruang-ruang yang tidak saling bertumpukan/bertindihan. Tetapi karena ke-tidak-idealan, ada penumpukan sinyal-sinyal yang tidak dapat dihindari dan interferensi kanal bersama total dapat kelihatan sebagai penundaan pesan yang panjang atau sebagai degradasi dari sinyal yang diterima yang diinginkan.

LAN radio akses acak (CSMA, CDMA) sangat menarik karena mereka membutuhkan sinkronisasi relatif lebih sedikit dan mendukung arsitektur terdistribusi. Tidak seperti jaringan-jaringan tugas tetap (FDMA, TDMA) yang menganggap semua pemakainya membutuhkan kanal mereka sendiri, teknik akses acak mengandalkan pada "bursty users" dan menganggap bahwa kemungkinan

banyak pemakai menggunakan jaringan pada saat yang sama adalah kecil. Untuk AGV yang menggunakan sistem *dead-reckoning* yang andal, pembaharuan-pembaharuan posisi yang jarang mendorong pemakaian jaringan akses acak untuk pengontrolan AGV. Di lain pihak, pengontrolan langsung sebuah fleet vehicle oleh sebuah stasiun pengiriman pusat (yang harus dijamin bebas dari kontaminasi reaktor nuklir) mungkin memerlukan skema tugas yang tetap. Ada juga tipe-tipe teknik akses yang sangat disukai yang nampaknya cocok untuk beberapa jaringan radio ruang tertutup.

Kerja dalam sistem komunikasi radio ruang tertutup telah memperlihatkan bahwa dengan menggunakan teknik slotted radio packet (slotted ALOHA), karakteristik delay dan keluaran sistem secara keseluruhan dapat diperbaiki melalui penangkapan. Sebuah teknik reservasi paket, yang menampung baik data dan suara, adalah sebuah contoh dari sebuah teknik slotted, packetized multiple access yang memanfaatkan kepenuhan percakapan dan memberi prioritas pada transmisi data.

Banyak yang tertarik untuk memakai TDMA untuk komunikasi-komunikasi radio bergerak dan portable. Di Eropa, Pan-European TDMA standart telah disetujui untuk radio-telepon seluler, dan beberapa penjual sedang mengusulkan TDMA untuk sistem seluler digital di Amerika. TDMA juga merupakan teknik yang pas untuk komunikasi-komunikasi radio ruang tertutup dengan pemakai jamak, dan bentuk dasar sistem komunikasi TDMA sedang dibangun pada laboratorium-laboratorium riset utama. TDMA memberikan banyak keuntungan, termasuk fleksibilitas dan kemurahan perangkat keras.

Beberapa sistem radio pabrik yang ada saat ini menggunakan TDMA untuk laju data rendah dan menggunakan beberapa bentuk rencana prioritas untuk mengalokasikan kembali time slot - time slot yang biasanya akan tidak digunakan. Sebuah keuntungan TDMA yang tidak kentara tetapi potensial adalah bahwa pemakai yang bergerak dapat mendengar ke base station karena ia memancarkan ke pemakai lain dalam frame. Selama periode mendengar, penerima yang bergerak dapat memakai antenna diversity skala kecil untuk memilih antena untuk penerimaan terbaik (dan transmisi) untuk time slot yang akan datang. Keuntungan lebih jauh lagi adalah TDMA menyatakan secara langsung bahwa hanya satu pemakai yang mentransmisikan pada satu saat.

FDMA itu menguntungkan karena sistem multiple-access dapat dibangun di sekitar teknologi narrow-band yang ada dan terbukti di lapangan. Meskipun FDMA memerlukan lebih banyak perangkat keras untuk sejumlah pemakai (karena jumlah kanal komunikasi yang besar), laju data dalam kanal-kanal ini kecil. Jadi, pemakai-pemakai dalam sistem FDMA tidak dikenai interferensi intersymbol yang diinduksikan oleh multipath, yang dapat mempengaruhi kanal-kanal TDMA dengan laju bit tinggi. Ekualisasi, yang menjadi sebuah persoalan dalam sistem TDMA, biasanya tidak diperlukan untuk FDMA karena tiap-tiap kanal mengalami flat fading. Dengan meningkatnya jumlah pemakai, kemampuan komunikasi sepenuh waktu dari teknik akses acak berkurang, dan pendekatan penetapan tetap dibutuhkan. Lebih jauh lagi, jika komputer pusat yang menggunakan arsitektur pengontrolan paralel diperlukan untuk menyerempakkan komunikasi, pengendalian, dan pengontrolan banyak pemakai secara serentak

pada sebuah basis kontinyu yang sebenarnya, pendekatan-pendekatan TDMA atau FDMA mungkin diinginkan. Pemakai-pemakai yang bergerak/portable yang mentransmisikan blok-blok data besar (yaitu MIS, transmisi gambar, grafik resolusi tinggi, peta dan sebagainya) tertampung sangat baik dengan sebuah jaringan tugas tetap.

Pemilihan strategi-strategi jaringan untuk link radio dalam pabrik akan sangat tergantung pada jumlah pemakai, selang waktu transmisi, batas kecanggihan masing-masing terminal, perlunya pengontrolan sepenuh waktu, dan diinginkan atau tidaknya pemakaian radio untuk pengendalian AGV.

BAB V

KESIMPULAN

Dari studi tentang komunikasi radio ruang tertutup untuk pabrik di masa depan yang sudah dibahas pada bab sebelumnya dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Secara umum pabrik-pabrik mempunyai struktur bangunan yang hampir serupa. Gang-gangnya lurus dan tidak dikacaukan, dan secara umum dibatasi oleh mesin-mesin atau barang-barang pabrik. Hanya ada sedikit dinding-dinding dalam, meskipun sebagian besar peralatan dan daerah penyimpanan barang-barang dapat berfungsi sebagai pemecah RF. Peralatan pabrik dan kerangka bangunan terbuat terutama dari bahan logam. Sebagian besar pabrik mempunyai struktur lantai tunggal.
2. Ada empat topografi yang umum untuk semua pabrik dan menentukan karakteristik propagasi dalam topografi tersebut yaitu Line-of-Sight Light clutter, Line-of-Sight Heavy clutter, Obstructed Light clutter, dan Obstructed Heavy clutter.
3. Dari data hasil pengukuran path loss dan fading terlihat bahwa path loss tergantung pada lingkungan sekitar dan mempunyai distribusi log-normal, fading sesaat berdistribusi Rician, dan fading skala kecil yang disebabkan

karena gerakan penerima mempunyai distribusi terutama Rayleigh walaupun distribusi Rician dan log-normal memenuhi sebagian dari data.

4. Nilai rms delay spread telah didapatkan berkisar antara 30 sampai 300 ns. Harga rms delay spread ini tidak dipengaruhi oleh jarak pemancar-penerima atau topografi pabrik, tetapi dipengaruhi oleh peralatan-peralatan pabrik, material konstruksi bangunan, lokasi dinding dan umur pabrik.
5. Sistem antenna terdistribusi mampu memperbaiki performance sistem terutama masalah rms delay spread dan redaman jika dibandingkan dengan sistem antenna tunggal yang melayani seluruh bangunan pabrik.
6. Dengan *Optimum Combining*, sistem dengan sebuah antenna pada tiap-tiap *remote* dan M antenna pada *base station* dapat mencapai kenaikan kapasitas M kali atau mampu menekan $M - 1$ penginterferensi bahkan ketika daya penginterferensi lebih besar dari pada daya sinyal yang dikehendaki.
7. Pemilihan strategi-strategi jaringan untuk kanal radio dalam pabrik sangat tergantung pada jumlah pemakai, selang waktu transmisi, batas kecanggihan masing-masing terminal, perlunya pengontrolan sepenuh waktu, dan diinginkan atau tidaknya pemakaian radio untuk pengendalian AGV (Autonomous Guided Vehicle).

Daftar Pustaka

1. A. A. M. Saleh and Valenzuela, "A statistical Model For Indoor Multipath Propagation," *IEEE Trans. Journal Selection Areas of Communication*, vol SAC-5, no.2, pp 138-146, Feb. 1987.
2. A. A. M. Saleh, A. J. Rustako, Jr., and R. Roman, "Distributed Antena for Indoor Radio Communications," *IEEE Trans. Comm.* Vol COM-35, no 12, pp. 1,245-1,251, Dec.1987.
3. D. Cox, R. Murray, and A. Norris, "Measurement of 800-MHz Radio Transmission into Buildings with Metallic Walls," *Bell System Tech. Jour.*, vol 62, no 9, pp.2,695, 2,716, Nov.1983.
4. H. H. Hoffman and D. C. Cox, "Attenuation of 900 MHz Radio Waves Propagating into A Metal Building," *IEEE Trans. Ant. Prop.*, vol AP-30, pp. 808-811, July.1982.
5. J.H. Winters, "Optimum Combining for Indoor Radio System with Multiple Users," *IEEE Trans. Comm.*, vol. COM-35, no. 11, pp. 1,222-1,230, Nov.1987.
6. K. Sam Shamugan, "Digital and Analog Communication Systems", John Wiley and Sons, 1979.
7. R. Bultitude, "Measurement, Characterization and Modelling of Indoor 800/900 MHz Radio Channel for Digital Communication," *IEEE Communication Magazine*, vol. 25, no. 6, pp. 5-12, June. 1987.
8. S. E. Alexander, "Radio Propagation within Buildings at 900 MHz," *Electronic Letter*, vol. 18, pp. 913-914, Oct. 14, 1982.
9. T. Rappaport and C. McGillem, "UHF Fading in Factories," *IEEE J. Sel. Areas Comm.*, Jan.1989.
10. T.S. Rappaport, "Characterization of Multipath Radio Channel in Manufacturing Environments," *IEE Trans. Ant. Prop.*, Aug.1989. Presented in

part at *IEEE Globecom '88*, Hollywood, FL, pp. 26-5.1 - 26-5.7, Nov. 29, 1988.

11. T. Rappaport, "Indoor Radio Communication for Factories of the Future," *IEEE Communication Magazine*, May 1989.
12. Theodore S. Rappaport, "Wireless Communications, Principle and Practise," Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 1996.
13. T. Rappaport, "Delay Spread and Time Delay Jitter in Manufacturing Environments," *1988 IEEE Veh. Tech. Conf. Record*, Philadelphia, PA, pp186-189, June 15, 1988.
14. T. Rappaport, "Statistical Channel Impulse Response for Factory and Open Plan Building Radio Communication System Design," *IEEE Transactions On Communication*, vol. 39, No. 5, May 1991.

29 JUL 1996

EL 1799 TUGAS AKHIR 6 SKS

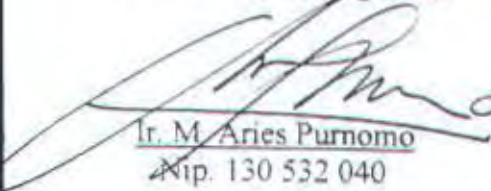
Nama : DJUWARI
Nomor Pokok : 292 220 1963
Bidang Studi : Teknik Telekomunikasi
Tugas diberikan : Agustus 1996
Dosen Pembimbing : Ir. Faisal Gunawan
Judul Tugas Akhir : STUDI TENTANG KOMUNIKASI RADIO RUANG
TERTUTUP UNTUK PABRIK-PABRIK DI MASA DEPAN
Uraian Tugas Akhir :

Dengan semakin berkembangnya otomatisasi pabrik, diperlukan suatu sistem komunikasi sepenuh waktu yang andal antara peralatan dengan komputer pengontrolnya. Komunikasi ini dapat dilakukan dengan atau tanpa kabel. Untuk komunikasi tanpa kabel berarti diperlukan suatu sistem radio.

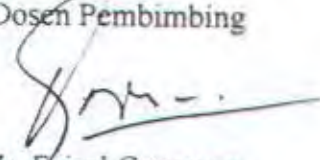
Lingkungan sekitar yang terdiri atas dinding, lantai, konstruksi dan struktur atap tertentu menciptakan suatu lingkungan yang bermusuhan untuk sistem radio, dimana di dalam sebuah bangunan propagasi dari gelombang radio sulit ditebak dan berubah secara kontinyu. Oleh karena itu diperlukan suatu studi untuk mempelajari karakteristik propagasi gelombang radio dalam ruang tertutup yang diharapkan dapat diaplikasikan secara nyata.

Mengetahui

Koordinator Bidang Studi


Ir. M. Aries Purnomo
Nip. 130 532 040

Dosen Pembimbing


Ir. Faisal Gunawan
Nip. 130 325 773

Ketua Jurusan Teknik Elektro


DR. Ir. Moch. Salehudin, M.Eng.Sc.
Nip. 130 532 026



USULAN TUGAS AKHIR

1. JUDUL TUGAS AKHIR : STUDI TENTANG KOMUNIKASI RADIO RUANG
TERTUTUP UNTUK PABRIK-PABRIK DI MASA
DEPAN

2. RUANG LINGKUP : - SISTEM KOMUNIKASI I / II
- SISTEM KOMUNIKASI GELOMBANG MIKRO
- TEORI & RANGKAIAN GELOMBANG MIKRO

3. LATAR BELAKANG : Ledakan dalam otomatisasi pabrik telah menciptakan sebuah kebutuhan akan komunikasi sepenuh waktu yang andal. Dalam sebuah pabrik yang menggunakan otomatisasi dalam operasinya, peralatan atau mesin yang digunakan mempunyai bagian-bagian yang bergerak yang dikontrol melalui komputer. Komunikasi antara peralatan dengan komputer dapat dilakukan dengan menggunakan kabel atau tanpa kabel (wireless). Sebuah Autonomous Guided Vehicle (AGV) yang sesungguhnya yang tidak menggunakan kabel, memerlukan sebuah sistem radio untuk pengontrolannya. Sistem optik sebenarnya juga mungkin digunakan, tetapi tidak akan bekerja bila terhalangi. Lebih jauh lagi sistem radio mampu memberikan hubungan yang cepat dan tidak terlalu mahal antara peralatan pabrik yang sering bergerak dengan terminal komputer. Radio juga dapat digunakan

untuk komunikasi suara/data yang dapat dikonfigurasi dengan sistem yang sudah ada. Dengan menggunakan teknik modulasi tertentu dan multipleksing dapat dibentuk sebuah sistem dapat menangani kebutuhan di atas dengan lebih baik dan murah.

4. PENELAAHAN STUDI : Dalam sistem komunikasi ruang tertutup, yang lingkungan sekelilingnya adalah dinding bangunan, lantai, konstruksi bangunan dan struktur atap tertentu menciptakan sebuah lingkungan yang bermusuhan untuk komunikasi radio, dimana di dalam sebuah bangunan propagasi dari gelombang radio sulit ditebak dan berubah secara kontinyu. Masalah-masalah yang meliputi multipath dan shadow fading yang memperkecil daerah cakupan, dispersi karena pelebaran delay, yang membatasi kecepatan data maksimum. Lebih jauh lagi di dalam bangunan dengan pemakai jamak, interferensi antara pemakai dapat menjadi suatu masalah yang serius, dan spektrum yang digunakan mungkin lebih kecil daripada yang dibutuhkan untuk menangani seluruh pemakai yang potensial.

5. TUJUAN

Mempelajari karakteristik propagasi gelombang radio dalam ruangan pada suatu frekuensi tertentu dengan memperhitungkan faktor-faktor penting di atas.

6. LANGKAH-LANGKAH : 1). Studi literatur

2). Pembahasan dari literatur

3). Analisa

4). Kesimpulan

5). Penulisan naskah

7. JADWAL KEGIATAN

Kegiatan	Bulan					
	I	II	III	IV	V	VI
Studi literatur						
Pembahasan dari literatur						
Analisa						
Kesimpulan						
Penulisan naskah						

8. RELEVANSI

Dengan dipahaminya tentang karakteristik propagasi dari gelombang radio dalam ruang tertutup, maka diharapkan dapat dibuat suatu perencanaan tentang aplikasi dari bidang ini untuk suatu pabrik tertentu.

KARAKTERISTIK TRANSMISI DATA DALAM BANGUNAN DI JEPANG

Service area	Indoor 100 m
Communication systems	simplex, duplex
Transmission data	digital data
Operating frequency band and number of frequencies	400 MHz (VHF), 910 MHz (UHF) 56 frequencies (51 ch)
Type of emission	F1D, F2D
Separation of transmitter and receiver frequency	19,6 MHz
Channel spacing	12,5 kHz
Carrier power output	less than 10 mW
System error rate	1×10^{-3} without error correction
Modulation method & Data spread sub carrier MSK FSK	1.200, 2400 bps 1.800 bps

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir di Kediri pada tanggal 21 Desember 1973 sebagai anak ke-dua dari empat bersaudara dari pasangan Ponidjan Prawira Sukarta dan Sri Handayani. Pengalaman pendidikan sebagai berikut :

- ✧ Lulus TK. Dharma Wanita Pertiwi Setonopande Kediri tahun 1980
- ✧ Lulus SD Negeri Setonopande I Kediri tahun 1986
- ✧ Lulus SMP Negeri 3 Kediri tahun 1989
- ✧ Lulus SMA Negeri 2 Kediri tahun 1992
- ✧ Masuk sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro FTI-ITS tahun 1992 dengan nomor pokok 2292.100.134

Pengalaman organisasi selama menjadi mahasiswa Teknik Elektro :

- Panitia Lomba Cipta Elektro Teknik tahun 1994
- Panitia Electrical Workshop tahun 1994
- Panitia Syukuran Pelepasan Sarjana 1994
- Asisten Praktikum Dasar Sistem Komunikasi 1995